

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství



Analýza použití SiC při výrobě litin

Analysis of the Use of SiC in Cast Iron Production

DIPLOMOVÁ PRÁCE

THESIS

AUTOR PRÁCE:

AUTHOR

Bc. PETR KOPKA

VEDOUcí PRÁCE:

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HAMPL, Ph.D.

OSTRAVA 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra metalurgie a slévárenství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Kopka**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie
Téma: **Analýza použití SiC při výrobě litin**
Analysis of the Use of SiC in Cast Iron Production
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Stanovení cílů práce a postup řešení
2. Literární rozbor použití SiC při výrobě litin
3. Rozbor technologie tavení při použití SiC
4. Provedení experimentálních taveb
5. Vyhodnocení zkušebních odlitků
6. Vyhodnocení cílů práce
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VONDRÁK, V., HAMPL, J., HANUS, A. *Metalurgie litin-mimopecní zpracování litiny*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [2] NEUMANN, F. *Gusseisen, Renningen-Malmsheim, expert-verlag*, 1999, ISBN 3-8169-1728-3.
- [3] OTÁHAL, V. *Tvárná litina*, <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/tvarna-litina/>.
- [4] ODEHNAL, J. *Metalurgické a technologické aspekty odlévání hmotných odlitků ze slitin železa*. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava, 2015.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

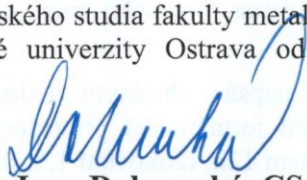
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 23.4.2018

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Hamplovi, Ph.D. za udělené rady, pomoc při vyhodnocování zkoušek, odborné vedení taveb a připomínky k této diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Robinu Novotnému za provádění taveb, udělené rady, odbornou pomoc při přípravě jednotlivých vzorků. Také panu Miloši Weiperovi za přípravu vzorků k tahové zkoušce. Za pomoc při vyhodnocování a provádění mechanických zkoušek děkuji Ing. Petře Váňové, Ph.D. A nakonec paní Ivaně Malé za pomoc při vyhodnocování mikrostruktur a přípravě jednotlivých vzorků.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem vlivu karbidu křemíku na krystalizaci litin. V teoretické části práce jsou obecně popsány zákonitosti krystalizace litin, se zaměřením na porovnání vlivu metalurgického zpracování litin karbidem křemíku a ferosiliciem. V experimentální části se vyhodnocovaly laboratorní tavby s různými obsahy SiC a FeSi75. Zkušební odlitky se vyhodnotily metalografickou, chemickou a termickou analýzou i rozbořem mechanických vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

Krystalizace, karbid křemíku, mikrostruktura, litiny, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This thesis deals with the study of the effect of silicon carbide on the crystallization of cast iron. In the theoretical part of the thesis are described the regularities of crystallization cast iron, with a focus on comparison of the influence of metalurgical processing of cast iron by silicon carbide and ferosilicium. In the experimental part, laboratory melts with different contents of SiC and FeSi75 were evaluated. Test castings are evaluated by metallographic, chemical and thermal analysis and by analysis of mechanical properties.

KEYWORDS

Crystallization, silicon carbide, microstructure, cast iron, mechanical properties

Obsah

ÚVOD	1
1 LITINY.....	2
1.1 DRUHY LITIN	2
1.2 VLASTNOSTI LITIN	2
1.3 OČKOVÁNÍ	3
1.4 MODIFIKACE	4
2 POUŽITÍ SiC PŘI VÝROBĚ LITIN	5
2.1 KŘEMÍK.....	5
2.2 FEROSILICIUM	6
2.3 KARBID KŘEMÍKU	7
2.3.1 Výroba karbidu křemíku.....	9
2.3.2 Charakteristika SiC.....	10
2.3.3 Použití SiC.....	11
3 TECHNOLOGIE TAVENÍ PŘI POUŽITÍ SiC	12
3.1 Vliv SiC na tvorbu primárního austenitu.	12
4 POPIS ZKOUŠEK A VYHODNOCOVÁNÍ	15
4.1 ZÁKALKOVÁ ZKOUŠKA	15
4.2 VYHODNOCENÍ MIKROSTRUKTURY.....	16
4.2.1 Matrice.....	17
4.2.2 Složky základní kovové hmoty	17
4.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ.....	18
4.4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	19
5 EXPERIMENTÁLNÍ TAVBY	20
5.1 VSÁZKOVÝ MATERIÁL.....	20
5.2 PŘÍPRAVA FOREM.....	21
5.3 VÝSLEDNÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY	23
6 PRŮBĚH TAVEB A JEJICH VYHODNOCENÍ	24

6.1	PRVNÍ TAVBA: VZORKY 1A - 6A.....	25
6.1.1	Zákalka: vzorky 1A – 6A	28
6.1.1.1	Vyhodnocení zákalky	29
6.1.2	Mikrostruktura: Vzorky 1A – 6A	30
6.1.2.1	Vyhodnocení mikrostruktury	33
6.1.3	Chemická analýza: Vzorky 1A – 6A.....	33
6.1.4	Mechanické zkoušky	33
6.1.5	Křivky ochlazování.....	35
6.2	DRUHÁ TAVBA: VZORKY 1B - 6B.....	36
6.2.1	Zákalka: vzorky 1B – 3B.....	37
6.2.1.1	Vyhodnocení zákalky	38
6.2.2	Mikrostruktura: Vzorky 1B – 6B.....	39
6.2.2.1	Vyhodnocení mikrostruktury	42
6.2.3	Chemická analýza: Vzorky 1B – 6B	42
6.2.4	Mechanické zkoušky	42
6.2.5	Křivky ochlazování.....	44
6.3	TŘETÍ TAVBA: VZORKY 1C - 6C.....	45
6.3.1	Zákalka: vzorky 1C – 2C.....	46
6.3.1.1	Vyhodnocení zákalky	46
6.3.2	Mikrostruktura: Vzorky 1C – 6C.....	47
6.3.2.1	Vyhodnocení mikrostruktury	50
6.3.3	Chemická analýza: Vzorky 1C – 6C	50
6.3.4	Mechanické zkoušky	50
6.3.5	Křivky ochlazování.....	52
	ZÁVĚR	54
	POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	57
	POUŽITÉ OBRÁZKY	59
	POUŽITÉ TABULKY	61

POUŽITÉ GRAFY	61
PŘÍLOHA.....	62

ÚVOD

Litiny jsou stále nejpoužívanějším materiálem pro výrobu odlitků. Díky svým vlastnostem se využívají stále víc. Litiny tak můžou nahradit ocelové odlitky pro určitý druh použití, kde mohou uplatnit své specifické vlastnosti. Nižší výrobní náklady, mechanické a slévárenské vlastnosti, zapříčinily vzrůstající objem všech litinových odlitků, používaných zejména v automobilovém, energetickém a strojírenském průmyslu. Značná část odlitků se odlévá z tzv. grafitických litin. Mezi jejich přednosti patří dobré slévárenské vlastnosti a dostačující mechanické vlastnosti. Tam, kde naopak potřebujeme vysokou tvrdost a odolnost proti otěru, použijeme litiny, které mají ve struktuře vyloučen cementit.

Pro vylepšení některých vlastností litin je potřeba použít předočkovadla, jako je karbid křemíku (SiC). Používá se zejména v metalurgii. Ve slévárenství se vyskytuje v mnoha formách. V USA bylo zavedeno jeho používání před druhou světovou válkou a v Evropě se začal používat ve velkém měřítku v 80. letech. Karbid křemíku se dodává o obsahu 90% SiC v různých granulacích, využití v elektrických pecích. Pro využití v kuplovnách je karbid křemíku dodáván v briketách.

Využití karbidu křemíku, který nahrazuje ferosilicium ve slévárenství, má také ekonomické odůvodnění (výrazně zvyšuje kvalitu litiny). Dle stechiometrického poměru se karbid křemíku v peci rozkládá ze 70-ti % na volný křemík Si a ze 30-ti % na volný uhlík C. Tyto složky se dále rozpouštějí v litině. Výhodou karbidu křemíku oproti ferosiliciu je, že při rostoucí teplotě roste odkysličovací schopnost uhlíku. U ferosilicia je tomu naopak. Tento velmi důležitý parametr nám zapříčiní to, že při použití SiC místo FeSi , můžeme zvýšit podíl šrotu.

Cílem práce bylo popsat vliv karbidu křemíku na krystalizaci litin. V experimentální části se vyhodnocovaly laboratorní tavby s různými obsahy SiC a FeSi75 . Výroba litinových odlitků byla provedena laboratorně (synteticky). Jako druhy vyrobených litin byly vyrobeny LLG, LČG a LKG. Porovnal se vliv SiC s vlivem FeSi . Vyhodnocovala se metalografie, chemická analýza, termická analýza a mechanické zkoušky. Čím kvalitnější metalurgické zpracování a mikrostruktura, tím lepší výsledné mechanické vlastnosti získáme. Záleží na materiálovém požadavku pro daný odlitek.

1 LITINY

Litiny jsou slitiny Fe, C, Si, Mn, S, P spolu s jinými prvky. Dále se vyznačují také tím, že je obsah uhlíku (C) vyšší než 2,11 %. V litinách se uhlík vyskytuje ve formě grafitu nebo cementitu. Grafitické litiny vynikají dobrými slévárenskými vlastnostmi a např. u litiny s kuličkovým grafitem i vysokými mechanickými vlastnostmi (pevnost v tahu). Naopak cementit, zaručuje dostatečnou tvrdost či odolnost proti otěru. [1]

1.1 DRUHY LITIN

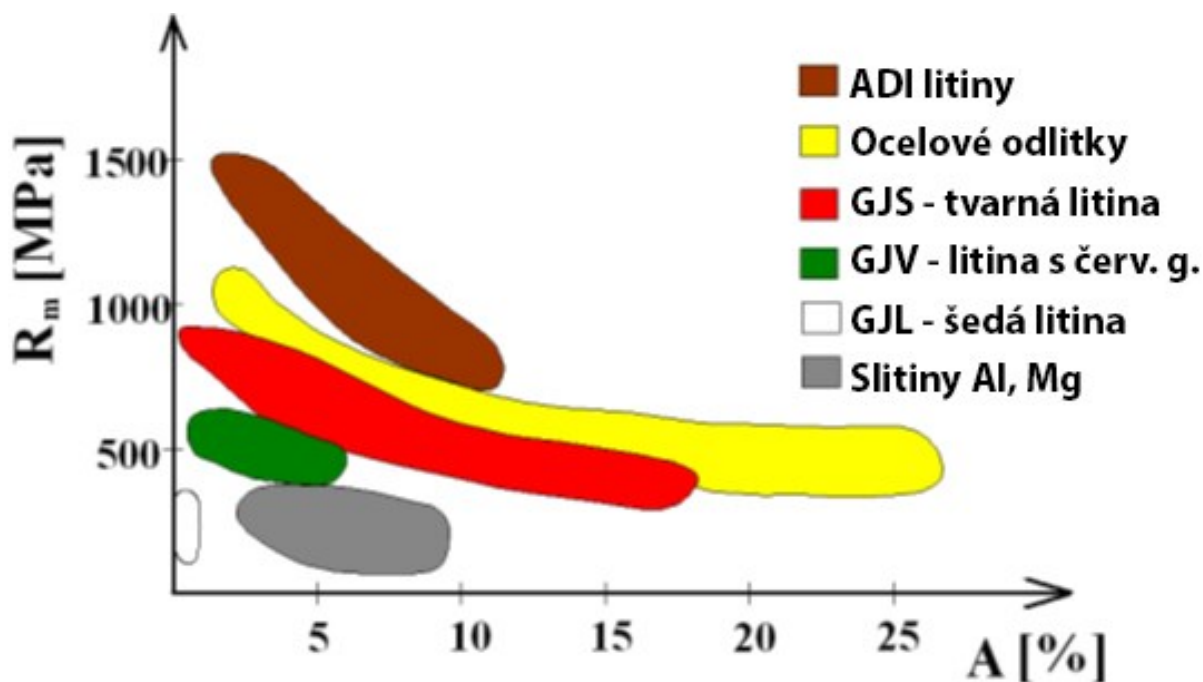
Stabilně tuhnou grafitické litiny (diagram Fe-C), uhlík má formu grafitu. Metastabilně, pak tuhnou bílé litiny (diagram Fe-Fe₃C), uhlík se zde vyskytuje jako karbid železa. [1]

- Šedá litina – LLG – litina s lupínkovým grafitem
- Tvárná litina – LKG – litina s kuličkovým grafitem
- Bílá litina – litina s volným cementitem, bez volně vyloučeného grafitu
- Izotermicky zušlechťená litina s kuličkovým grafitem – ADI
- Litiny s červíkovitým grafitem – LČG
- Temperované litiny s bílým lomem – TLB
- Temperované litiny s černým lomem – TLC
- Legované litiny pro speciální užití

1.2 VLASTNOSTI LITIN

Mezi nejdůležitější materiálové vlastnosti patří mechanické i slévárenské vlastnosti. Mezi nejdůležitější sledované slévárenské vlastnosti patří: zabíhavost, objemové změny, povrchové napětí, viskozita a tavitelnost.

Z hlediska mechanických vlastností, je důležitá mez pevnosti v tahu R_m (MPa), tažnost A (%), tvrdost dle Brinella (HB), rázová houževnatost KC (J) a další. Porovnání mechanických vlastností různých slévárenských slitin je na Obr. 1. [1] [2] [16]



Obr. 1 Tažnost a mez pevnosti v tahu slévarenských slitin [1]

1.3 OČKOVÁNÍ

Pro zlepšení určitých vlastností je možno provést mimopecní zpracování roztavené litiny, tzv. očkovaní. To nám zapříčiní ovlivnění konečné struktury materiálu. Vytvoří nám nové grafitizační zárodky, to má za následek rovnoměrné rozložení grafitu. Tímto je potlačeno vylučování volného cementitu s následkem menší tvorby zákalky. Očkovadla (očkovací látky) by měly mít totožnou krystalickou mřížku jako grafit. [1]

Vlivem očkovaní můžeme docílit lepších mechanických vlastností, zvýšení grafitizační schopnosti, snížení pnutí v odlitcích a sklonu k tvorbě zákalky.

Aby očkovaní proběhlo s požadovanými výslednými vlastnostmi, je nutno zejména dbát na výběr vhodného typu očkovadla, způsobu očkovaní, množství očkovadla, časový účinek očkovaní, zrnitost očkovadla a dodržování teploty. Např. u LLG litiny, očkovaní zapříčiní změnu velikosti a kvantity lupínek grafitu. Naproti tomu u LKG litiny se změní struktura základní kovové hmoty. [6] [2]

Jako očkovadla se nejčastěji používají typy na bázi křemíku jako je FeSi45-75 (Ferosilicium) či na bázi uhlíku. SiC (karbid křemíku), které se používá jako tzv. předočkovadlo. Vlivu karbidu křemíku na krystalizaci litin je věnována podstatná část této práce.

1.4 MODIFIKACE

Dalším nástrojem pro úpravu litin je modifikace. Důsledkem modifikace je výsledná změna tvaru grafitu, z lupínkového na kuličkový. Získáme tak litiny s kuličkovým grafitem a tím i lepší mechanické vlastností litiny. Jedná se také o mimopecní zpracování litiny a probíhá současně s očkovaním. Modifikace se provádí čistým hořčíkem nebo předslitinami, které Mg obsahují. [1]

Hořčík:

- Hustota: 1740 kg/m^3 - lehký, snaha vyplavat na hladinu.
- Teplota tavení: $650 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota vypařování: $1107 \text{ }^\circ\text{C}$ - při teplotě litiny se bouřlivě vypařuje a způsobuje rozstříkávání kovu.
- Hořčík má velmi silnou afinitu ke kyslíku a k síře.
- Podporuje metastabilní tuhnutí, vznik zákalky litiny - čím vyšší obsah Mg, tím větší sklon k zákalce.

Z důvodu bouřlivé reakce hořčíku se obvykle nemodifikuje čistým Mg, ale předslitinami FeSiMg nebo NiMg. Když je možno omezit nebo regulovat bouřlivost modifikační reakce, tak je přijatelné použít i čistý Mg.

Předslitiny FeSiMg obsahují asi 45 %Si a 3-15 %Mg. Bouřlivost reakce souvisí s obsahem Mg, čím více hořčíku použijeme tím bouřlivější reakci to vyvolá. Nejčastěji se využívá předslitin s obsahem 5-8 % Mg. Tyto předslitiny jsou lehčí, než je modifikovaný kov, proto se musí v modifikační pánvi zabezpečit proti vyplavání na hladinu. Oproti tomu slitiny s niklem jsou těžší než litina, tudíž se ponoří ke dnu. [6] [4] [8]

Modifikace probíhá tak, že páry hořčíku probublávají ode dna taveninou. Přitom Mg reaguje se sírou a kyslíkem, rozpuštěným v litině a tvoří chemické sloučeniny, často také spolu s křemíkem. Tyto vměstky se nazývají „sekundární struska“. Část hořčíkových par unikne z taveniny a na hladině shoří. Jen ta část, která se při cestě bublin Mg k hladině rozpustí v kovu vede ke vzniku kuličkového grafitu. Tento obsah hořčíku se nazývá „zbytkový hořčík“ - Mg_{zbyt} . Obsah Mg_{zbyt} musí být obvykle větší, než 0,03 %, nemá však být zbytečně vysoký, neboť vzniká více vměstků a litina má větší sklon k zákalce. U tenkostěnných odlitků stačí obsahy Mg jen mírně nad uvedenou hranici, u silnostěnných odlitků musí být vyšší, kolem 0,045-0,06 % Mg_{zbyt} . Převzato ze zdroje [6]

2 POUŽITÍ SiC PŘI VÝROBĚ LITIN

Karbid křemíku nám u litin zajistí požadované vlastnosti. Využití karbidu křemíku nahrazením ferosilicia ve slévárenství má ekonomické odůvodnění - výrazně zvyšuje kvalitu litiny. Karbid křemíku se v peci rozkládá 70-ti % na volný křemík Si a ze 30-ti % na volný uhlík C. Dále se tyto složky rozpouštějí v litině. Základním rozdílem mezi používáním karbidu křemíku a ferosilicia je, že s rostoucí teplotou roste odkysličovací schopnost uhlíku. Ferosilicium naopak s větší teplotou odkysličovací schopnost zhoršuje. Výše zmíněná výhoda má významný vliv na kvalitu litiny a umožňuje zvyšování podílu ocelového šrotu. [5] [9]

2.1 KŘEMÍK

V litinách je vedle uhlíku nejvýznamnější přísadou křemík, jehož obsah podle druhu litiny může mít velmi široké rozmezí. U slitin s relativně nižším obsahem křemíku (kolem 1%) i ostatních přísad (např. u nelegované bílé litiny), se uplatňuje metastabilní rovnováha soustavy Fe-C. U těchto slitin je ještě možno sledovat fázové přeměny za pomoci rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C. U litin s vyšším obsahem křemíku (tj. u LLG nelegované), cca víc jak 2% Si, a LKG nelegované, u nichž se uplatňuje stabilní rovnováha soustavy Fe-C-Si, je nutno přeměny při ochlazování sledovat v ternárním diagramu. [3]

Křemík:

- Hustota: 2332 kg/m³
- Teplota tavení: 1413 °C
- Teplota vypařování: 2355 °C
- S rostoucím obsahem křemíku klesá houževnatost feritu.
- Má velkou afinitu ke kyslíku.

Běžným zdrojem jsou surová železa s vyšším obsahem křemíku, kusové (o různé zrnitosti), nebo briketované ferosilicium s různým obsahem křemíku, karbid křemíku (SiC) zrnitý pro el. tavení, SiC brikety pro tavení v kuplovně. Pro použití kusového ferosilicia je nutný druh bez boru (používá se pro výroby temperované litiny). [3] [9] [2]

Karbid křemíku, se používá pro přípravu taveniny před vlastním očkovaním jako „předočkovadlo“. Obvykle obsahuje 70% Si a 30% C; pro el. tavby se používá zrnitý druh 90-92% SiC, pro kuplovný briketovaný druh 20-80% SiC (Tab. 1). [1]

Tab. 1 Obsah prvků očkovaadel [3]

Druh	%Si	%Al	%P
FeSi 45	41-47	1,0-1,2	0,03-0,04
FeSi 65	63-72	1,7-2,5	0,03-0,04
FeSi 75	72-78	1,8-2,5	0,04-0,05
FeSi 75 slévárenské	72-78	1,4-1,5	0,03-0,04
SiC brikety	34-36	25%C (zbytek struskotvorné přísady)	

Si-brikety s různým obsahem Si jsou vyráběny z podsítných podílů při drcení ferosilicia. Používají se jako zdroj Si pro tavení v kupolových pecích. Pro použití v el. pecích nejsou vhodné, neboť je zde nebezpečí vlhkosti (nutno před použitím vysušit). Při použití briket nutno znát použítá pojiva s ohledem na jejich účinek v tavícím a odstruskovacím procesu (nauhličení, propal Si a Mn, eroze vyzdívky apod). [6] [10]

2.2 FEROSILICIUM

Nejběžnějším druhem očkovaadla je ferosilicium (Obr. 2) s obsahem kolem 65-75 % Si a obvykle 1-2 % Al a 0,2-1 % Ca. Nejlepšího očkovacího účinku se dosahuje, když jsou v očkovaadle přítomny současně Ca i Al. Příliš vysoký obsah Al ovšem podporuje vznik bodlin. Také vysoký obsah Ca vede ke vzniku struskovitých vměstků. Proto se tyto prvky volí pro konkrétní užití. Očkovaadla na bázi ferosilicia obsahují i další krystalizačně aktivní prvky, ty mají za účel zlepšení očkovacího účinku, zpomalení rychlosti odeznívání očkovacího účinku či zlepšení rozpustnosti při nízkých teplotách. Mezi tyto prvky patří: [6] [17]

- **Mn** - (až 10 %) zlepšuje rozpustnost očkovaadla při nízkých teplotách litiny
- **Ti** - (až 10 %) používá se dosti zřídka, a to pro očkování LLG a LVG (ne LKG, neboť Ti zabraňuje vzniku kuličkového grafitu). Váže dusík a snižuje nebezpečí bodlin. Titan však může spolu s uhlíkem tvořit karbidy TiC, ty způsobují zvýšené opotřebení řezných nástrojů.
- **Ba** - (1-6 %) tvoří chemicky stálé zárodky s vysokou hustotou, které jen pomalu vyplouvají do strusky. Barium také prodlužuje dobu očkovacího účinku.
- **Zr** - (1-6 %) disponuje vysokou desoxidační schopností, zajišťuje dobrý očkovací účinek, zpomaluje odeznívání. Váže dusík a tím omezuje nebezpečí vzniku bodlin.

- **Ce** - (0,5-1,0 %) tvoří velmi stabilní oxidy a sirníky, snižuje rychlost odeznívání očkovacího účinku.
- **Sr** - (0,5-1,0 %) zvyšuje rychlost rozpouštění očkovadla a to i při nízkých teplotách kovu. Očkovací účinek je i při nízkém dávkování dlouhodobý a velmi dobrý. Výhodou je také, že málo zvyšuje počet eutektických buněk. [6] [10] [17]



Obr. 2 Ferosilicium - FeSi 75%

2.3 KARBID KŘEMÍKU

Karbid křemíku má tavicí teplotu nad 1700 °C, v litině se tedy netaví, nýbrž postupně rozpouští. Postupné tvoření zárodků nám zaručí dlouhodobý účinek očkování. SiC nám slouží pro přípravu taveniny před vlastním očkováním jako předočkovadlo. Obsahuje obvykle mezi 85-90 % SiC. Předočkování pomocí SiC je účinné i v krystalizačně nepříznivých podmínkách, např. při vysokém podílu oceli ve vsázce, nebo při tavení pouze z ocelového šrotu. Přídavek SiC pozitivně ovlivňuje počet krystalizačních zárodků grafitu v tavenině litiny (zvyšuje počet zárodků), čímž se zvyšuje počet grafitických částic a současně se snižuje náchylnost k výskytu karbidu ve struktuře. Vzhledem k dlouhodobému účinku je možno očkovat již do lázně v tavicí peci. Dávkování bývá kolem 0,5 %. Karbid křemíku je vyobrazen na Obr. 3. [8] [12]



Obr. 3 Karbid křemíku – SiC [15]

Úplně čistý karbid křemíku je bezbarvý. Jeho tvrdost je podobná tvrdosti diamantu. To je důvod, proč je běžně používán jako abrazivní materiál. Například je vhodný pro obrábění plastů, které mají vysokou tvrdost a nízkou pevnost v tahu. Díky vysoké tepelné a chemické odolnosti je možno ho použít pro výrobu žáruvzdorných materiálů. Také je dobrým vodičem elektrického proudu. [7] [11]

Karbid křemíku se používá ve slévárenství v mnoha formách a jeho využití je známo již řadu let. Nejprve se používal jako žáruvzdorný materiál v průmyslových pecích. Výborně se hodí tam, kde není ve styku s tekutým kovem, například v rekuperátorech, muflových pecích apod. Ve Spojených státech amerických bylo zavedeno jeho používání před druhou světovou válkou. Evropa jej začala používat ve velkém měřítku v 80. letech. Karbid křemíku pro využití v elektrických pecích se dodává hlavně o obsahu 90% SiC v různých granulacích. Pro využití v kuplovnách je karbid křemíku dodáván v briketách. [3] [12]

Mezi hlavní výhody patří:

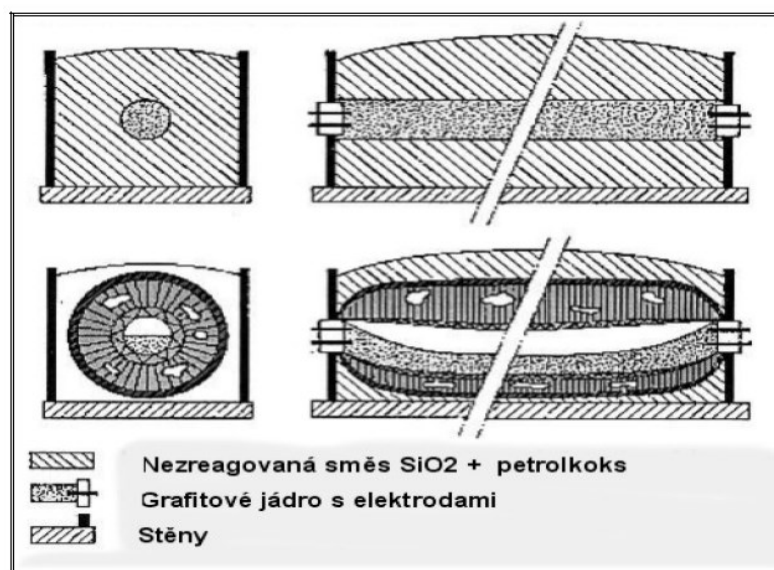
- Ekonomicky příznivější než použití FeSi-ferosilicium
- Vliv na snížení sklonu litiny k tvorbě ředin
- Zvýšení podílu ocelového odpadu ve vsázce
- Stabilizace mechanických vlastností

2.3.1 Výroba karbidu křemíku

Průmyslově se vyrábí reakcí velmi čistého křemenného písku s uhlíkem (koksem nebo antracitem) v EOP (2200-2400 °C). Vzniklá reakce $\text{SiO}_2 + 3 \text{C} = \text{SiC} + 2 \text{CO}$. Karbid křemíku vzniká při tavbě nárůstem krystalů v jádru pece. Po vychladnutí se pec rozebere, materiál se roztřídí a podle kvality je rozdělen na materiál vhodný pro výrobu brusných zrn a na materiál pro metalurgii.

Karbid křemíku SiC 98% se dále rozdrtí a na třídících linkách se tvaruje a třídí na jednotlivé typy brusných zrn. Černý karbid křemíku se používá především pro výrobu brousících nástrojů a pomůcek. Mezi další možnosti použití patří tryskání suchou i mokrou metodou, výroba žárovzdorných desek či pēchovacích směsí. V elektrotechnickém průmyslu nachází uplatnění při výrobě izolantů a bleskojistek. Skvěle se uplatní rovněž jako přídavek lamelových a rámových pil při řezání kamene, dále pak jako plnivo do epoxidových pryskyřic pro zvýšení odolnosti vůči opotřebení. Křemík se přidává jako kusový FeSi, jako zrnitý SiC či v briketách, blocích apod.

Vedle karbidu křemíku vzniká oxid uhelnatý. Celý proces probíhá při teplotách 1600 až 2700 °C. Karbid křemíku se nenatavuje a nedochází k jeho znečištění dalšími prvky. Výroba probíhá v dávkách přesahujících až 100t v EOP, na volném prostranství (viz. Obr.4). Jako elektrický odpor slouží jádro z grafitu a čistého koksu. Základní materiál je směs z písku a petrol-koksu. Spotřeba el. energie se pohybuje mezi 10 000 - 12 000kWh. Elektrody jsou chlazeny vodou. Doba pochodu činí cca 60 hodin. Pece pro výrobu např. 60 tun směsi SiC jsou 20m dlouhé a 3-5m široké. [3]



Obr. 4 Výroba SiC v pecích [3]

Po proběhlé reakci se pec rozbije. Ve středu v blízkosti jádra, se nachází vysoce čistý krystalický SiC. Směrem od tepelného středu se koncentrace SiC snižuje. V určité vzdálenosti se vytvoří tak zvaný amorfni SiC (metalurgický), který obsahuje od 88 do 93% SiC. Metalurgický karbid křemíku s 90% SiC obsahuje přibližně 4% volného uhlíku., 63% Si a 31% vázaného uhlíku, zbytek tvoří převážně SiO₂. [3]

2.3.2 Charakteristika SiC

Při zrnitosti do 10 mm je měrná hmotnost 3,2/cm³, sypaná hmotnost 1,3g/ cm³. Jak už bylo popsáno výše, v litině se SiC neroztavuje, ale rozpouští, neboť jeho bod tání je nad 1700 °C. Tím se vytvářejí podmínky, aby se v tavenině po delší dobu, postupně vylučoval nový grafit. Současně je grafit obklopen oblastí bohatou na křemík, který se tvoří kolem částic SiC. SiC obsahuje cca 30 až 50% uhlíku, neboť mimo uhlíku vázaného obsahuje metalurgický SiC i volný uhlík.

Křemík a uhlík v SiC mají těsně uspořádanou prostorově centrovanou mřížku, což způsobuje, že po rozpuštění SiC dochází k místnímu nadeutektickému složení taveniny a tím k příznivějším podmínkám k vylučování grafitu. Rozpuštění SiC není exotermickou reakcí jako u roztavení FeSi, ale reakcí endotermickou. Místní pokles teploty v okolí rozpuštěných částic SiC je větší, než je zjištěno měřením průměrné teploty, na příklad na křivkách ochlazování. Tím se zpomaluje difusní vyrovnání koncentrace mezi oblastmi dvorci a ostatní taveninou a grafit se stává stabilní a schopen dalšího růstu.

K prodloužení doby rozpouštění SiC může působit SiO₂ s teplotou tavení 1712°C, který je vždy v malém množství v SiC přítomen a který na povrchu částic vytváří přerušovanou ochrannou vrstvičku. Z toho důvodu je možno charakterizovat karbid křemíku především jako zdroj křemíku s dlouhodobě působícím, tak zvaným před-očkujícím účinkem. [3] [12]

2.3.3 Použití SiC

I přes poměrně vysokou cenu má karbid křemíku význam jako žáruvzdorný výrobek, k jeho rozkladu dochází teprve při 2700 °C. Nejvýhodnější jsou tyto vlastnosti: vysoká tepelná vodivost, tvrdost a mechanická pevnost. Používá se v pecích pro výrobu pouzder, vypalovacích pomůcek v keramickém průmyslu a při výrobě ocelí či litin. Cihly z karbidu (karborundové cihly) jsou spojeny jílem nebo nitridem křemíku Si₃N₄. SiC keramika nachází uplatnění při výrobě teplotně vysoce namáhaných částí strojů a zařízení. Díky ní mohou bez chlazení pracovat až do teploty 1400 °C a jsou o 60% lehčí, než vysokoteplotní slitiny z kovů. Pro brusivo se používá SiC o obsahu 98%. Pro metalurgické účely je používán materiál s min. obsahem 90% SiC viz. Tab. 2. [11] [14]

Tab. 2 Složení karbidu křemíku pro metalurgii [3]

Druh SiC	SiC	Volný C	Volný Si	SiO ₂	Al celkem	Al ₂ O ₃	S	Ti	N
SiC98	98,5	0,23	0,62	0,39	0,04	0,01	0,01	0,02	0,005
SiC90	89,8	3,49	0,14	4,30	0,18	0,47	0,09	0,05	0,06
SiC84	83,7	5,06	0,06	0,06	0,30	0,20	0,13	0,04	0,07

3 TECHNOLOGIE TAVENÍ PŘI POUŽITÍ SiC

Nejekonomičtější zdroj křemíku je SiC a proto se může zvolit tavba v nízkofrekvenční tavicí peci, zde totiž tavba probíhá ekonomicky při vsázkování do tekutého zbytku – 1/3 objemu z předchozí tavby, ta se postupně doplní do plného obsahu pece. Při následujícím odpichu se vylije zase jen 2/3 objemu. Nedodržení tohoto postupu může vést k poruše zařízení a špatné účinnosti tavby. Z těchto důvodů pracují pece na síťovou frekvenci v nepřetržitém provozu, kampaňovitě mezi jednotlivými opravami a obnovou vyzdívky.

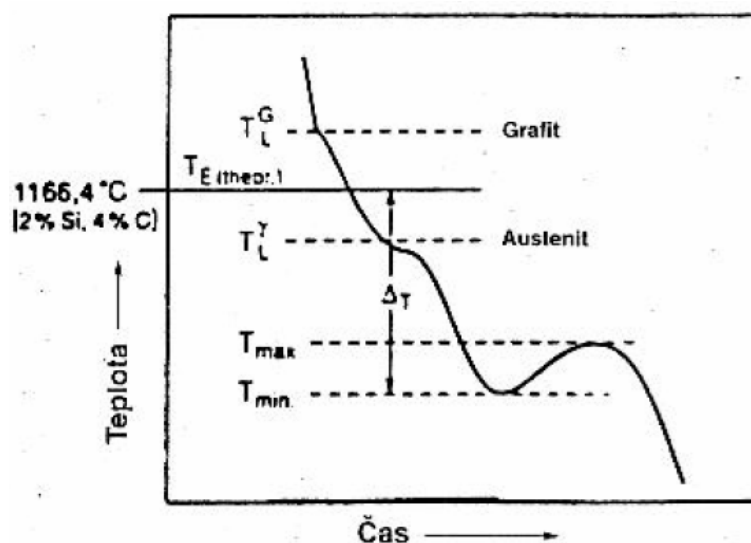
Vsázkové materiály se zavází do strusky prosté lázně násl. postupem:

- Přísada nahličovadla grafitu a karbidu křemíku se dávkuje přednostně při dostatečném příkonu, aby se docílilo promísení lázní.
- Poté se přisazuje kovový materiál s příkonem dle doporučení výrobce el. pecí. Těžší materiály se vsázkují nakonec, aby se zatížila předchozí drobnější vsázka a zamezilo se mostění.

Při tomto postupu se dosáhne maximálního využití uhlíku a křemíku, při čemž je právě karbid křemíku nejekonomičtějším zdrojem křemíku. [3]

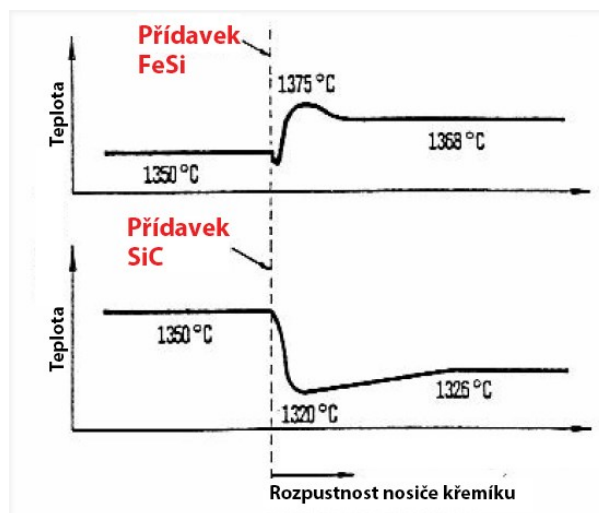
3.1 Vliv SiC na tvorbu primárního austenitu.

Počátek krystalizace austenitu při ochlazování litiny zpracované čistým Si, nebo ve formě FeSi a SiC není totožný. Křemík ve formě SiC snižuje velikost přechlazení (podchlazení) při vzniku austenitu (Obr. 5 a 6)



Obr. 5 Křivka ochlazování litiny 2% Si, 4% C [3]

To má za následek změnu tvaru dendritů austenitu, a rozložení grafitu a počtu eutektických zrn. Ve všech případech, s rostoucím ekvivalentem uhlíku se zlepšovalo rozložení grafitu, snižovalo se eutektické přechlazení (podchlazení) a rostl počet eutektických zrn. Množství grafitu a počet eutektických zrn roste, za současného poklesu přechlazení s intenzitou použitého nosiče křemíku. Například u Si99,99 a FeSi75 činí počet eutektických buněk cca 8 až 15, při přechlazení eutektika 18 až 20 °C, zatímco u SiC84 a SiC98 je počet eutektických buněk 60 až 70 a přechlazení eutektika kolem 8 až 10 °C. [3]



Obr. 6 Vliv přísady 2% FeSi a SiC do slitiny Fe-C na teplotu taveniny [3]

Při silně podeutektickém složení litiny a použití SiC84 a SiC90 vznikají četnější a kratší dendrity než při požití FeSi75, ale i SiC98. Jsou i příznivější podmínky pro typ grafitu A (u LLG) v důsledku relativně krátkých, rovnoměrně rozložených dendritů. Silně vyvinuté, dlouhé dendrity jsou naopak doprovázeny grafitem typu E. Tyto skutečnosti se vysvětlují přímým působením částic SiC na tvorbu a růst primárního austenitu.

Vylučování grafitu je přechodnou fází při rozpouštění SiC v tavenině. Při rozpouštění SiC v tavenině se tvoří velké množství grafitu, který zůstává po dlouhou dobu v tavenině termodynamicky stálý. Grafit se může v tavenině rozpouštět pouze při nízké koncentraci křemíku. [5]

Kinetika postupného rozpouštění vede k tvorbě lokálních oblastí v roztavené litině, které jsou bohaté na křemík a uhlík. Zatímco se křemík rozpouští poměrně lehce, tak uhlík obtížněji. Uhlík je hůře rozpustný, a to zvláště za přítomnosti křemíku, pak na rozhraní taveniny s rozpouštějícími se krystaly SiC, musí být tavenina bohatá na křemík, aby se utvářel grafit. Poté se tyto lokální oblasti tvořené konglomeráty (SiC/grafit), bohaté na křemík a

nasycené uhlíkem, přetransformují na oblasti obsahující grafit jako pórovitý, houbový konglomerát, který je prostoupen (prosáknut) taveninou. Postupně zde zůstává jen velký počet velmi malých uhlíkových částic. Tyto oblasti mají též jen určitou životnost, která závisí na teplotě a difusi; proudění taveniny má poměrně malý vliv. Životnost zárodků též ovlivňují stopové prvky, jako na příklad síra, které mohou zpomalit rozpouštění.

Konglomeráty, které mohou vydržet v tavenině delší dobu, jsou shluky C_n – molekul, které jsou příliš malé na to, aby mohly být detektovány. Jsou však patrné svým projevem, který v tavenině uplatňují. Jedním z vlivů je, že mohou působit jako grafitové zárodky, které budou pokračovat do okamžiku pokud se C_n shluky nerozpadnou na C_n molekuly a poté na atomy. Jedině v této etapě, která je ideálním stavem, je uhlík zcela rozpustný v železné tavenině. Pokud zůstávají C_n - shluky v tavenině, bude obsah ideálně rozpuštěného uhlíku v litině nižší, než-li celkový, analyticky zjištěný obsah uhlíku. V závislosti od poměru nerozpuštěných C_n - shluků se musí primární austenit začít tvořit při vyšších teplotách. To však znamená, že C_n -shluky nejsou pouze hnací silou nukleace grafitu, ale též ovlivňují krystalizaci austenitu. [3] [14]

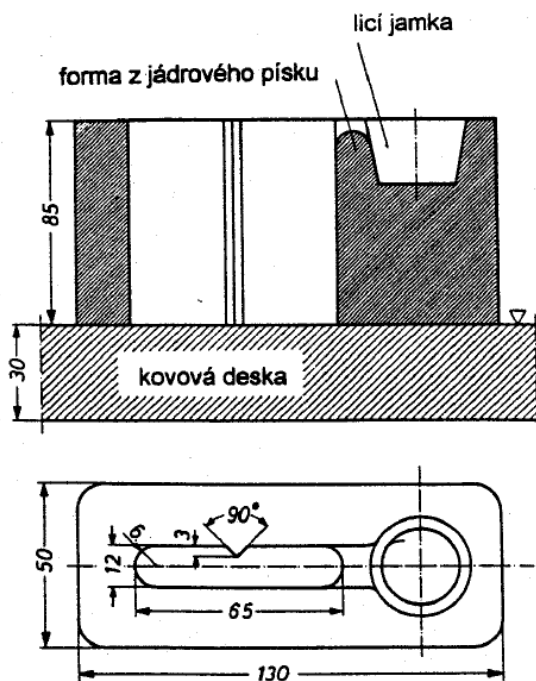
4 POPIS ZKOUŠEK A VYHODNOCOVÁNÍ

Pro vyhodnocení odlitých vzorků byly provedeny zákalkové zkoušky, metalografické výbrusy, mechanické zkoušky, chemická a termická analýza. Kompletní vyhodnocení všech dosažených struktur a výsledků, je uvedeno v praktické části této práce.

4.1 ZÁKALKOVÁ ZKOUŠKA

Jedná se o jednoduchou a rychlou kontrolu, zákalka se označuje jako výskyt bílé struktury-ledeburitu (karbidů) v místech s rychlým odvodem tepla-tenké stěny, rohy apod. v odlitcích z grafitických litin. Přechodový typ mezi grafitickými a bílými litinami tvoří tzv. maková litina, která obsahuje jak grafitické, tak metastabilní eutektikum. Zákalka je většinou v litinách nežádoucí.

Princip zákalkové zkoušky spočívá v odlití vzorku kovu do zkušební formy, přelomení ztuhlého vzorku a změření hloubky zákalky (metastabilní struktury bez vyloučeného grafitu). Používají se buď zkoušky konstantního průřezu s intenzivním odvodem tepla v jednom směru pomocí kovové chladicí desky – např. zkouška ISO (Obr. 7) nebo zkoušky s proměnným průřezem (a tudíž proměnnou rychlostí chladnutí) – tzv. klínové zkoušky (také Obr.7). [6]



Obr. 7 Zákalková zkouška – konstantní průřez (vlevo) [6] a klínový průřez (vpravo)

4.2 VYHODNOCENÍ MIKROSTRUKTURY

U vyhodnocování mikrostruktur byly posuzovány:

- **Tvar grafitu**
- **Rozložení grafitu**
- **Výskyt složek základní kovové hmoty**

Pro vyhodnocení mikrostruktur byly vzorky uřezány z odlitých tyčí (ze spodní části tyče). Na připravených nařezaných vzorcích byly nejprve zbroušeny nerovnosti na brusce s hrubozrným papírem. Tyto úkony byly provedeny ve slévárenské laboratoři.

Dále, již v metalografické laboratoři, byly vzorky broušeny na jemnějších brusných papírech. Byly využity tyto papíry 320,600,800,1200 a 2500. Po dostatečném vybroušení se vzorky přešly na leštícím přístroji. Zde byla jako leštidlo použita „hlinka“, která je roztokem H_2O s Al_2O_3 . Po dokonalém vyleštění se vzorky opláchly vodou a následně technickým lihem. Po takto provedeném očištění od zbytku leštidla, se provedlo důkladné vysušení pomocí fěnu, aby ve výsledných strukturách nebyly žádné pozůstatky použitého líhu či leštidla. Vše bylo u každého vzorku kontrolováno pomocí mikroskopu.

Takto připravené výbrusy, se nejprve nafotily na mikroskopu, jen leštěné. A to ve zvětšení 100x a 500x. U těchto fotek byl pozorován tvar, množství a velikost grafitu.

Po těchto úkonech následovalo naleptání každého vzorku pomocí kyseliny dusičné 4% HNO_3 („nital“). Leptání u většiny vzorků probíhá v řádu sekund. Při přeleptání nebo naopak nedostatečném leptání, jsou složky nerozeznatelné, proto tato část vyžadovala zvýšenou pečlivost. Naleptání nám na jednotlivých vzorcích ukázalo, jaké strukturní složky se v dané litině nacházejí. Dále již jen následovalo nafocení na mikroskopu, zase ve zvětšení 100x a 500x.

Takto vytvořené fotky se dále vyhodnocovaly podle normy ČSN 42 0461, název normy: Hodnocení metalografické struktury litin.

Zjišťoval se druh matrice, popis grafitu a výskyt dalších složek. Níže jsou stručně popsány jednotlivé zjištěné matrice a strukturní složky.

Vyhodnocování proběhlo dle normy ČSN 42 0461, název normy: Hodnocení metalografické struktury litin. Popsán byl grafit (Tab. 3) a výskyt dalších strukturních složek.

Tab. 3 Legenda k vyhodnocení mikrostruktur [13]

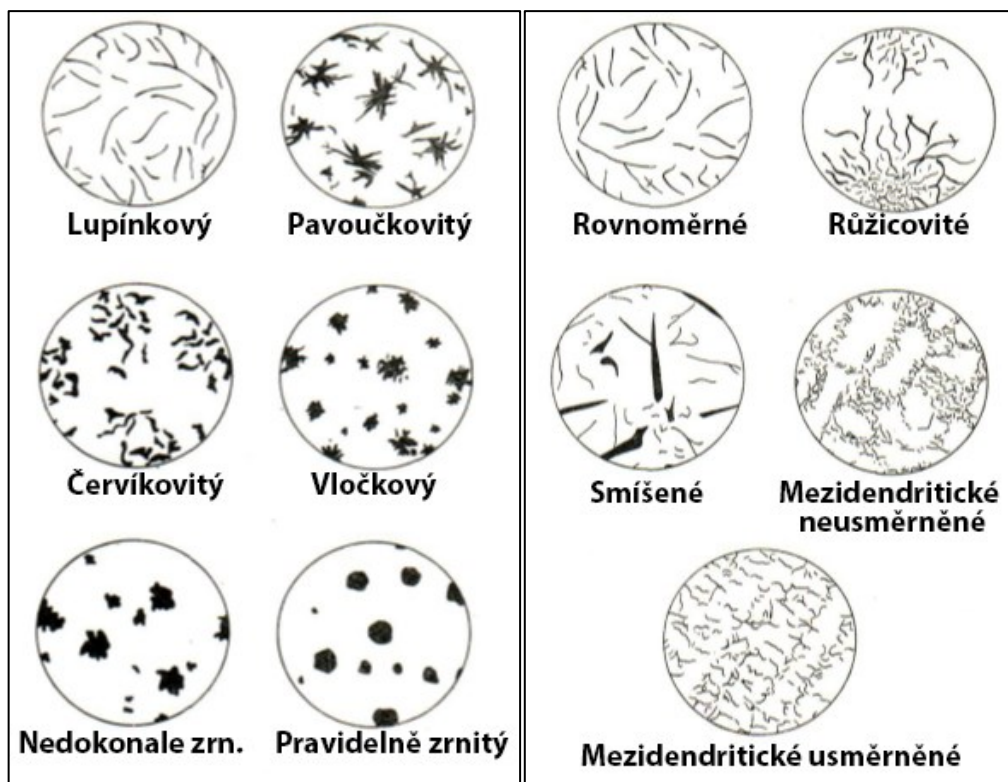
LEGENDA	
Tvar grafitu	
I	lupínkový
II	pavoučkovitý
III	červíkovitý
IV	vločkový
V	nedokonale zrnitý
VI	pravidelně zrnitý
Rozložení grafitu u LLG	
A	rovnoměrně
B	růžicovité
C	smíšené
D	mezidendritické neusměrněné
E	mezidendritické usměrněné
Velikost grafitu (μm)	
1	nad 1000
2	nad 500 do 1000
3	nad 250 do 500
4	nad 120 do 250
5	nad 60 do 120
6	nad 30 do 60
7	nad 15 do 30
8	do 15

4.2.1 Matrice

- **Feritická** - vznik při nízké ochlazovací rychlosti a při zvýšeném množství křemíku.
- **Perlitická** - vzniká při vyšší ochlazovací rychlosti a podporují ji prvky Cu, Cr, Mo, Ni, Sn. [13]

4.2.2 Složky základní kovové hmoty

- **Grafit** - krystalická forma uhlíku. Eutektický - vznik při tuhnutí eutektika, primární - vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických grafitických litin. (Obr. 8)



Obr. 8 Tvar grafitu (vlevo) a rozložení grafitu (vpravo, LLG litiny) [13]

- **Ferit**, vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu. Mechanické vlastnosti feritu: měkký, relativně nízká pevnost, tvárný, dobře obrobitelný.
- **Perlit**, eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Je tvořen feritem a perlitickým cementitem (ten zaručuje větší pevnost a tvrdost, než má ferit). [13] [6]

4.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Vyhodnocení chemického složení odlitých vzorků se provedlo na přístroji (Obr. 9). Výsledné chemické složení se zaznamenalo do tabulek. Pro tuto analýzu byly pro nás nejdůležitější zaznamenat zejména tyto prvky – uhlík C, křemík Si, mangan Mn, fosfor P, síra S, chrom Cr a hořčík Mg.

Chemické složení u litin ovlivňuje zvláště:

- grafitizační schopnost při tuhnutí litiny
- strukturu litiny

Litiny obsahují vedle železa další základní prvky, legury a nečistoty. Základními prvky jsou C, Si, Mn, P a S. Tyto prvky jsou obsaženy v každém druhu litin a jejich množství je pro vlastnosti litiny obvykle rozhodující. Legury jsou prvky, které ovlivňují strukturu litiny, vedou ke vzniku takových strukturních složek, které v nelegované litině běžně nevznikají, nebo pomocí nich litina získává odlišné mechanické, fyzikální nebo chemické vlastnosti. [6]

4.4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

U odlitků byly hodnoceny následující mechanické vlastnosti:

- **pevnost** - mez pevnosti v tahu R_m a pevnost v tlaku R_{m-tlak} [MPa]
- **plastické vlastnosti** - tažnost A_{60} [%]
- **tvrdost** – měření tvrdosti dle Brinella HBW 30 [HB]

Pevnost v tlaku a tahu se zjišťovala na zkušebních tyčích (Obr.9). Vyhodnocovala se tažnost A_{60} [%] a R_m [MPa]. Výsledkem tahových zkoušek byly hodnoty napětí spolu s prodloužením.



Obr. 9 Výsledná zkušební tyč pro tahovou zkoušku

Měření tvrdosti se vyhodnocovalo na vzorcích z odlitých zkušebních tyčí (Obr. 16). Měření tvrdosti bylo prováděno dle Brinella HBW 30. Na každém vzorku bylo provedeno několik měření, ze kterých se získala výsledná hodnota HB.

5 EXPERIMENTÁLNÍ TAVBY

Tavby byly provedeny ve slévárenské laboratoři VŠB-TU Ostrava, zde se také vyrobily formy potřebné pro zkušební vzorky. Tavení proběhlo v elektrické indukční peci – o obsahu 30kg. Na výrobu forem byla použita bentonitová směs, do kterých se odlévaly všechny provedené experimentální tavby.

5.1 VSÁZKOVÝ MATERIÁL

Pro všechny vzorky byla použita ocel EN-ČSN 12 013, označ. AREMA. Hmotnost vsázky byla 30 kg. Vsázkový materiál můžete vidět na Obr. 10. Chemické složení použitého vsázkového materiálu je v Tab.4.

Tab. 4 Chemické složení vsázkového materiálu

Ocel	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)
ČSN 12.013	0,02	0,36	0,07	0,018	0,02	0,05	0,07



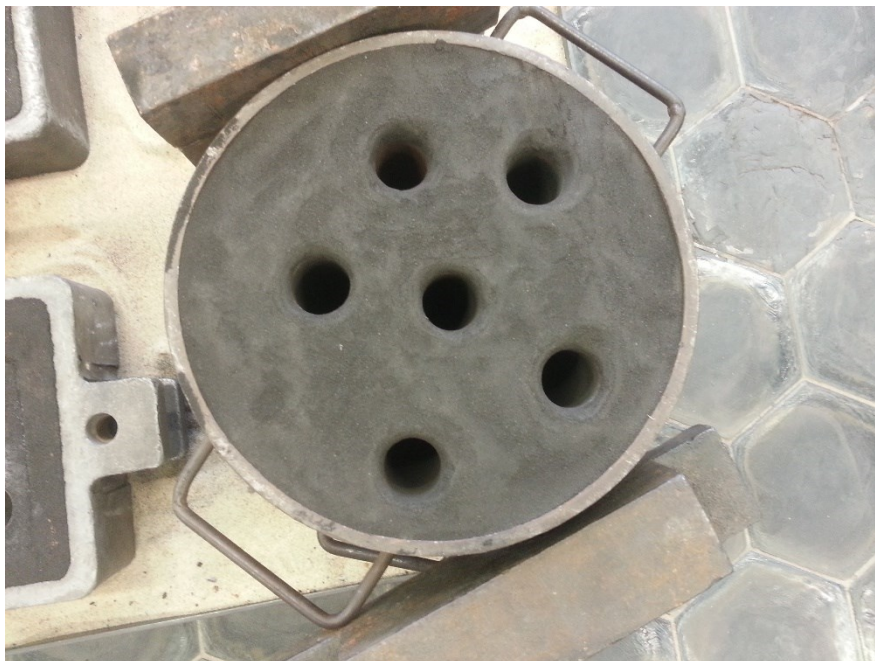
Obr. 10 Vsázkový materiál – Ocel ČSN 12.013

5.2 PŘÍPRAVA FOREM

Pro tavby byly zhotoveny formy na zákalkovou zkoušku (Obr. 11) a dále forma pro zkušební tyče, ze kterých byly provedeny mechanické zkoušky a dále odebrány vzorky pro metalografické výbrusy (Obr.12).



Obr. 11 Forma pro zákalkovou zkoušku



Obr. 12 Forma pro zkušební tyče

Jako formovací materiál byla použita bentonitová směs. Formy se nechaly odstát pro dostatečné vysušení (Obr. 13). Formovalo se směsí s bentonitovým pojivem.



Obr. 13 Připravené formy

Dále byl nachystán přípravek pro vzorky na chemickou analýzu a termickou analýzu (Obr. 15). Pro termickou analýzu byly použity kelímky s telurem (Obr. 14).



Obr. 14 Kelímky pro termickou analýzu



Obr. 15 Stojánek pro kelímek na termickou analýzu a kokila pro vzorky na chemickou analýzu

5.3 VÝSLEDNÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY

Celkem bylo odlito 18 tyčí pro mechanické zkoušky (Obr. 16), 12 provedených zákalkových zkoušek (Obr. 17), 18 metalografických výbrusů a 36 vzorků pro chemickou analýzu (Obr. 17).



Obr. 16 Odlitek pro tahovou zkoušku a výřez pro metalografii



Obr. 17 Odlitek pro zákalkovou zkoušku a pro chemickou analýzu

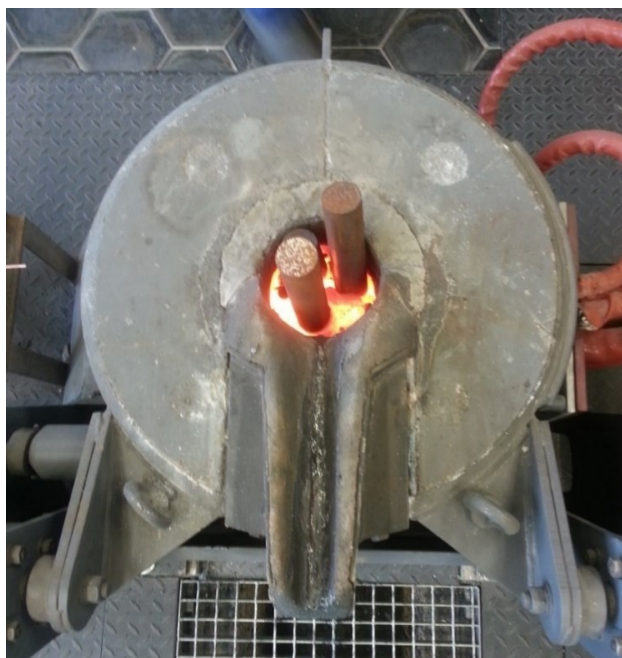
6 PRŮBĚH TAVEB A JEJICH VYHODNOCENÍ

Tavby proběhly ve slévarenské laboratoři VŠB-TU Ostrava. Zde byla využita indukční pec pro laboratorní účely, Inductotherm (Obr. 18, 19).



Obr. 18 Laboratorní pec - obsah 30kg

Ve všech provedených taveb byly vyrobeny syntetické typy litin a to LLG, LČG a LKG.



Obr. 19 Tavba v indukční peci

Pro vyhodnocení odlitků byly provedeny následující úkony:

- Zákalková zkouška
- Vyhodnocení mikrostruktury
- Mechanické zkoušky
- Chemická analýza
- Křivky chlazení

6.1 PRVNÍ TAVBA: VZORKY 1A - 6A

Cílem první tavy bylo zjištění, zda SiC zajistí dokonalou strukturu LLG (litinu s typem grafitu I A), bez použití očkovadla FeSi75.

Pro tavbu byl použita čistá ocel AREMA, bylo použito 30kg vsázky. Před vložením do pece se ocel částečně očistila od rzi. Pak mohla být vložena do pece, kde se postupně roztavila (Obr. 19).

Dále byl přidán karbid křemíku SiC (Obr. 20) v množství 1050g \rightarrow 1,75% Si, 1,4% C. Jako výrobce SiC byl zvolen Resorbent, typ SiC90 o zrnitosti 0-10 mm. Chemické složení SiC je znázorněno v Tab. 5.

Tab. 5 Chemické složení karbidu křemíku SiC 90 [15]

SiC 90	SiC (%)	Fe (%)	C (%)	Vlhkost (%)
Resorbent	min 90	max 0,5	max 3	max 0,5



Obr. 20 Karbid křemíku

Aby byl získán požadovaný typ litiny, tak se v tavbách provedlo nauhličení pomocí nauhličovadla DESULCO (Obr. 21). Chemické složení nauhličovadla je uvedeno v Tab. 6. Typ nauhličovadla Resorbent Desulco 9001 o zrnitosti 0,2 – 9,5 mm.

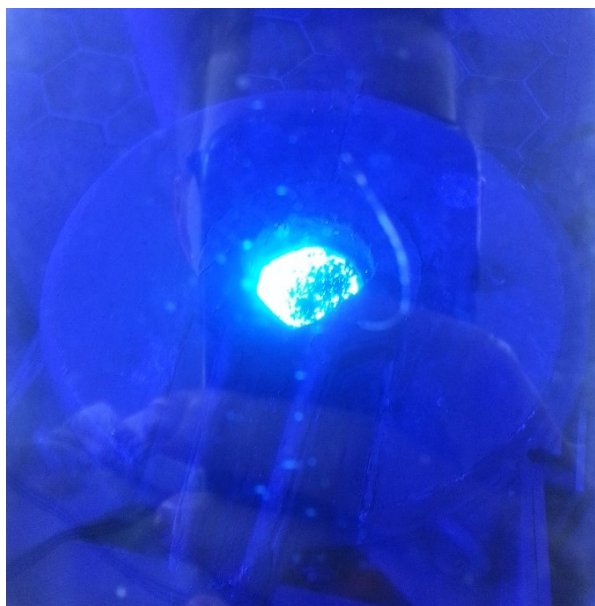
Tab. 6 Chemické složení nauhličovadla [15]

Resorbent	C (%)	S (%)	N (%)	H (%)	Prchavé látky (%)	Popel (%)	Voda (%)
Desulco	min 99,7	max 0,03	max 0,018	max 0,012	max 0,2	max 0,3	max 0,2



Obr. 21 Nauhličovadlo – Desulco

Nauhličovadlo bylo vkládáno na hladinu taveniny. Do taveniny bylo nejprve vloženo 510g Desulca. Množství nauhličovadla se řídilo dle termické analýzy a z této analýzy zjištěných hodnot. Zjistilo se, že nauhličovadlo nemá požadovanou zabíravost a tak musela být jeho dávka zvýšena, pro optimální hodnotu obsahu uhlíku % C. Vložené nauhličovadlo je vidět na Obr. 22.



Obr. 22 Působení nauhličovadla

V první tavbě bylo provedeno šest vylití, vzorky označeny **řadou A**, níže je popsáno množství použitého nauhličovadla (Tab.7):

1. LLG → Bylo vloženo 510 g – nauhličovadlo; 1050g SiC, 1,75% Si. Jelikož mělo nauhličovadlo špatnou zabíravost (bylo vloženo na hladinu taveniny) musela být dávka Desulca zvýšena o 250 g. První vzorek odlit při obsahu C 3,08%.
2. LLG → 80g Desulco; 3,3% C
3. LLG → 60g Desulco; 3,53% C
4. LLG → 40g Desulco; 3,64% C
5. LLG → 30g Desulco; 3,85% C
6. LLG → 20g Desulco; 3,91% C

Obsah uhlíku C a stav taveniny byl vyhodnocován pomocí termické analýzy.

Tab. 7 Množství vloženého nauhličovadla

Odlitek	Desulco
1A	250g
2A	80g (1,6%)
3A	60g (1,2%)
4A	40g (0,8%)
5A	30g (0,6%)
6A	20g (0,4%)

6.1.1 Zákalka: vzorky 1A – 6A



Obr. 23 Hodnocení zákalky z první tavby 1A-6A



Obr. 24 Výška zákalky vzorku 1A ,2A a 3A



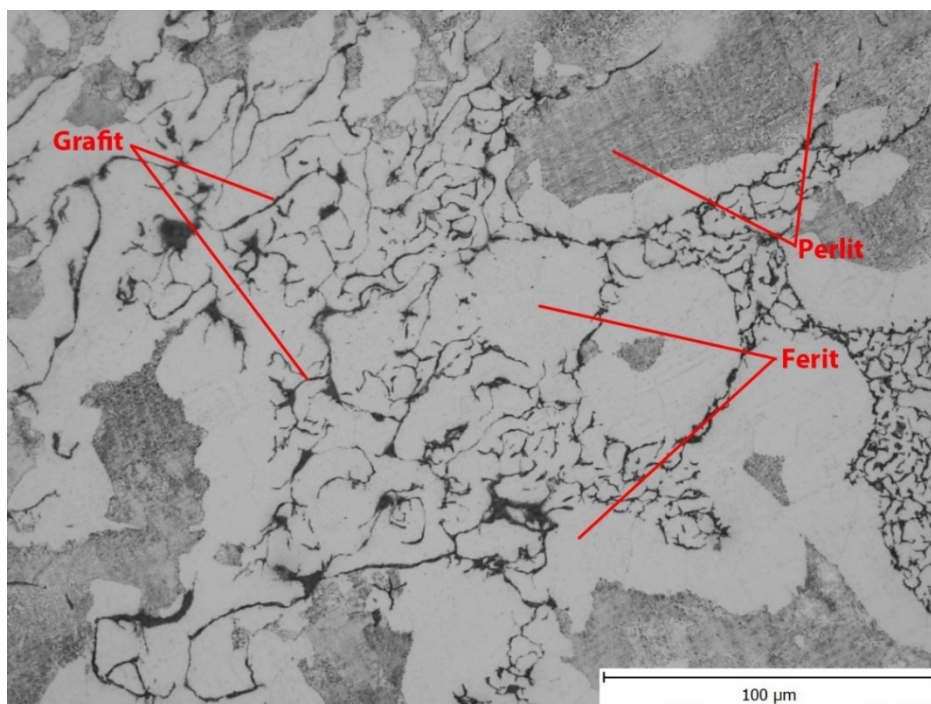
Obr. 25 Výška zákalky vzorku 4A, 5A a 6A

6.1.1.1 Vyhodnocení zákalky

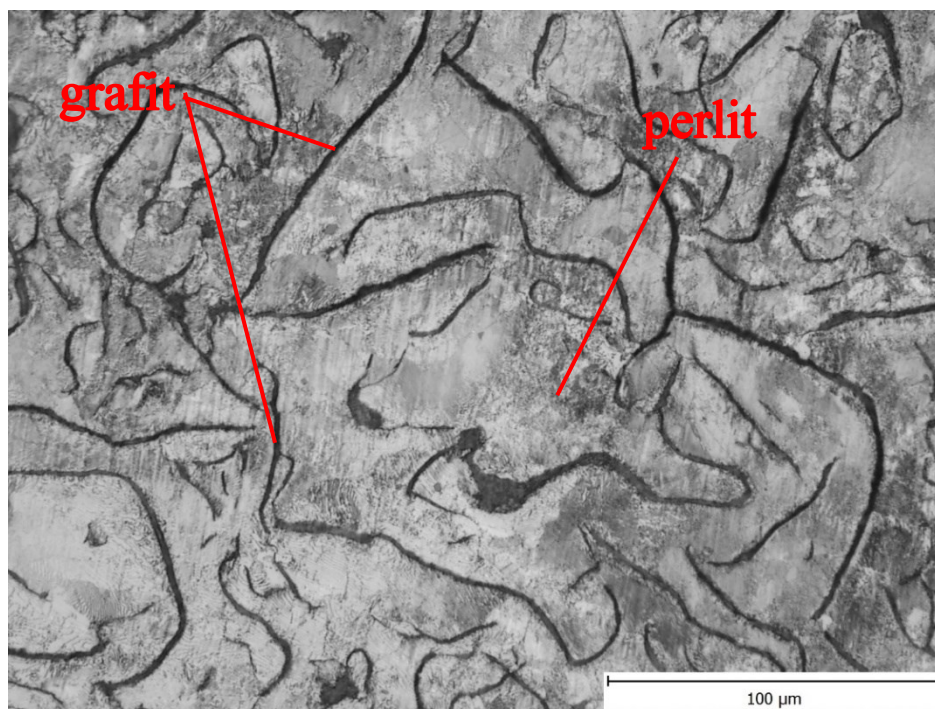
Z uskutečněných zákalkových zkoušek je patrné, že s rostoucím obsahem uhlíku se zákalka (metastabilní struktura bez vyloučeného grafitu) zmenšuje.

6.1.2 Mikrostruktura: Vzorky 1A – 6A

Pro ukázkou byly vybrány dva vzorky ze série A ve 500x zvětšení, ostatní jsou v příloze 1-6.

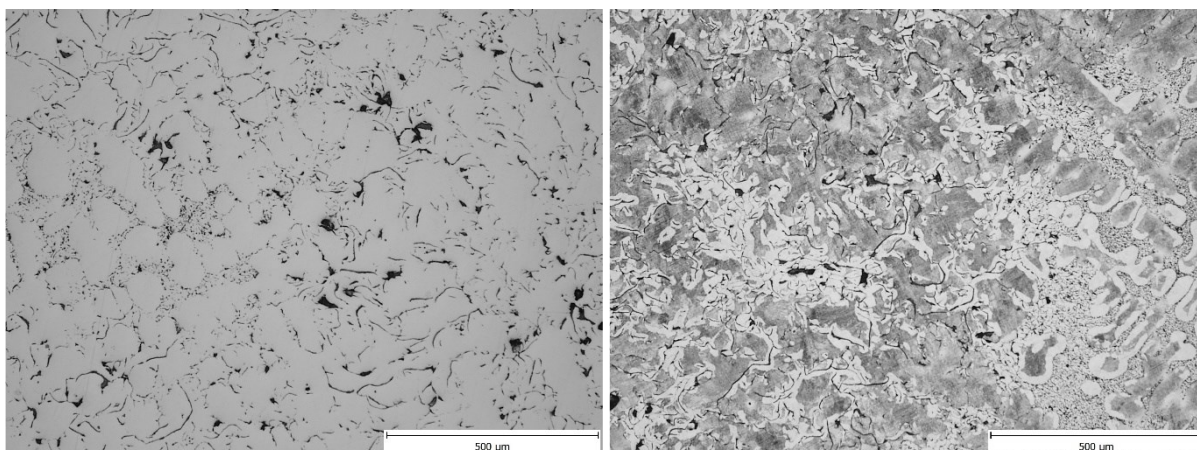


Obr. 26 Vzorek 1A LLG: 70% I E 4 + 30% I E 5 - P 70, Fe 30; SC 0,847; C = 3,08%; zvětšeno 500x

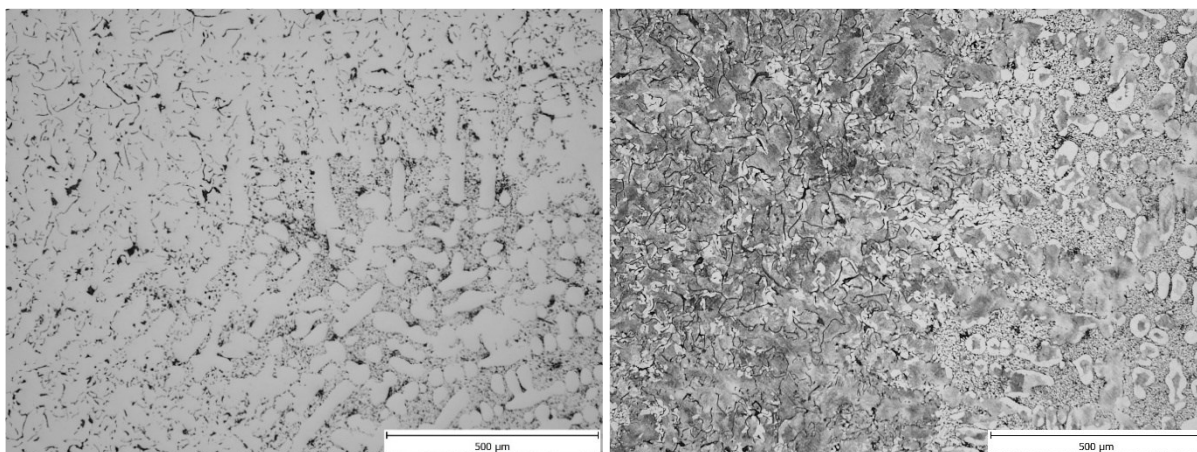


Obr. 27 Vzorek 5A LLG: I C 4 - P 92, Fe 8; SC 1,052; C = 3,85%; $R_m = 76$ MPa; zvětšeno 500x

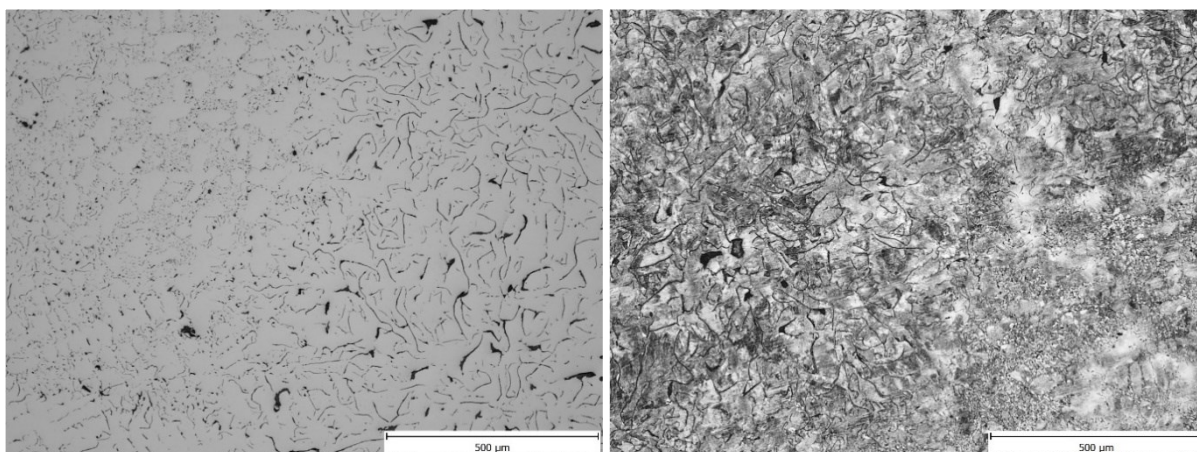
Níže jsou popsány vzorky ve 100x zvětšení, vlevo v leštěném stavu a vpravo leptané.



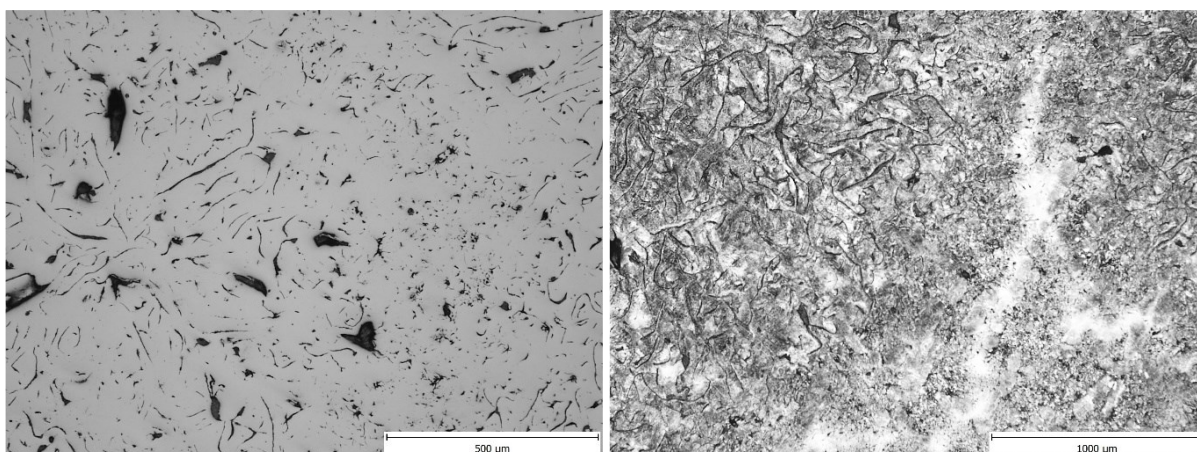
Obr. 28 Vzorek 1A LLG: 70% I E 4 + 30% I E 5 - P 70, Fe 30; SC 0,847; C = 3,08%



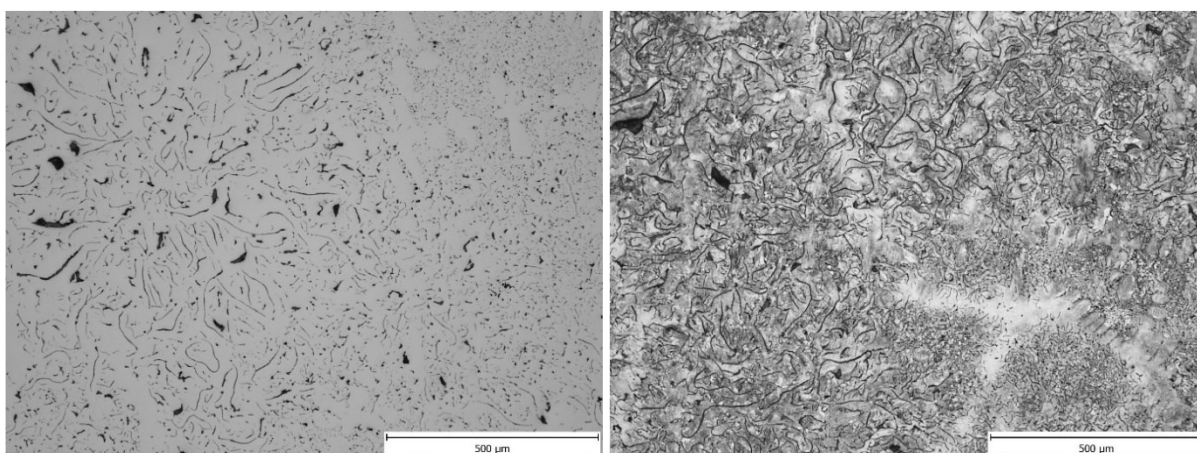
Obr. 29 Vzorek 2A LLG: I E 5 - P 85, Fe 15; SC 0,900; C = 3,3%



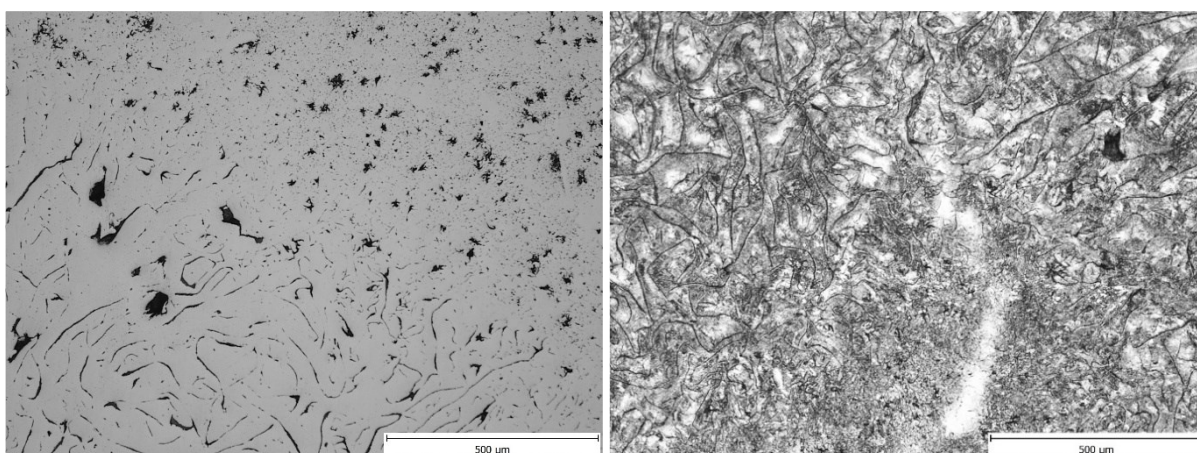
Obr. 30 Vzorek 3A LLG: I E 5 + I D 4 - P 85, Fe 15; SC 0,965; C = 3,53%



Obr. 31 Vzorek 4A LLG: 50% IC 5 + 50% D 4 - P 92, Fe 8; SC 1,008; C = 3,64%



Obr. 32 Vzorek 5A LLG: IC 4 - P 92, Fe 8; SC 1,052; C = 3,85%; $R_m = 76$ MPa



Obr. 33 Vzorek 6A LLG: 80% IC 6 + 20% IE 4 - P 92, Fe 8; SC 1,073; C = 3,91%; $R_m = 86$ MPa

6.1.2.1 Vyhodnocení mikrostruktury

U vzorků LLG série A s použitím SiC, se ve vzorcích vyskytuje grafit typu I C, I E a I D, tj. lupínkového tvaru, mezidendriticky neusměrněného, usměrněného a smíšeného rozložení. Jako složky základní kovové hmoty se v první tavbě vyskytuje perlit s feritem. Struktury odpovídají neočkované litině, tzn. výskyt mezidendritického grafitu. Karbid křemíku (bez očkování), nezaručil dokonalou strukturu. Grafit se nevyskytuje jako typ I A, ale pouze jako typ I C, I E a I D.

6.1.3 Chemická analýza: Vzorky 1A – 6A

V tabulce 8 je uvedeno chemické složení jednotlivých vzorků.

Tab. 8 Chemické složení vzorků 1A-6A

ŘADA A										
Vzorek	C (%)		Si (%)		Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	CEL	SC
	SPE	TA	SPE	TA						
1A	3.09	3.08	1.98	1.84	0.30	0.021	0.024	0.076	3.51	0.847
2A	3.35	3.3	1.99	1.78	0.31	0.022	0.026	0.074	3.72	0.900
3A	3.51	3.53	1.99	1.78	0.31	0.024	0.026	0.073	3.97	0.965
4A	3.64	3.64	2.01	1.98	0.31	0.023	0.025	0.072	4.13	1.008
5A	3.79	3.85	2.01	1.78	0.31	0.025	0.027	0.072	4.3	1.052
6A	3.91	3.91	2.03	1.84	0.32	0.025	0.028	0.073	4.38	1.073

SPE - spektrální analýza, TA - termická analýza, CEL - ekvivalentní uhlík (TA), SC - stupeň eutektičnosti (TA)

6.1.4 Mechanické zkoušky

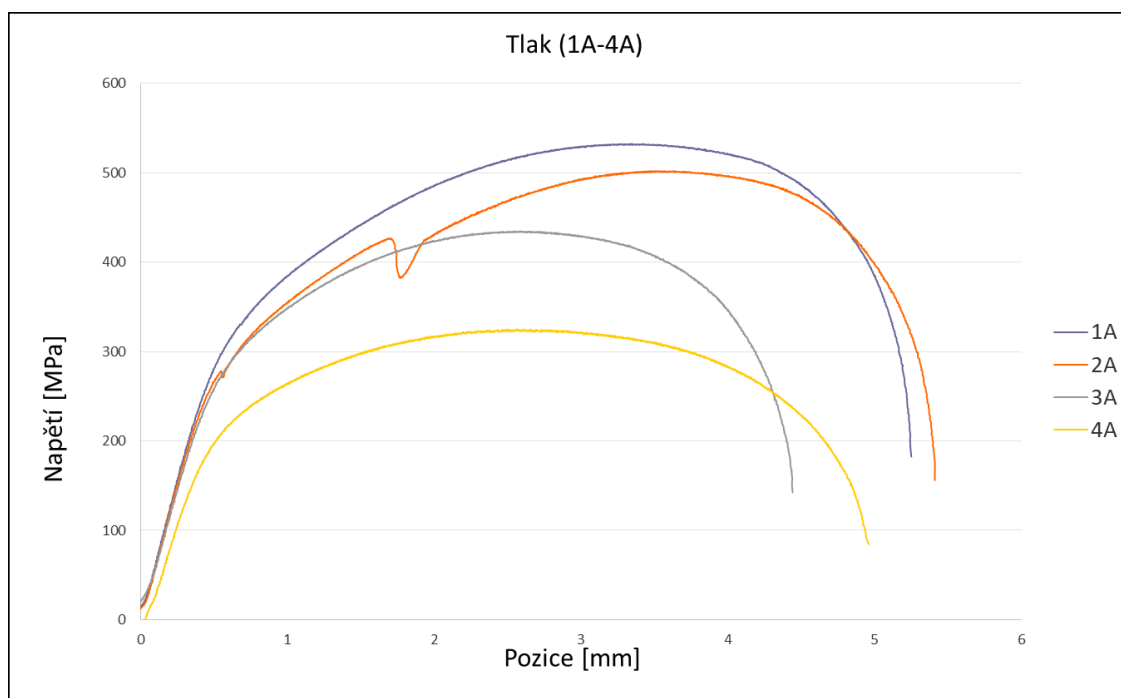
U vzorků 1A-4A byla provedena zkouška tlakem (graf 1 a Tab.9) a u 5A-6A zkouška tahem (graf 2). Dosažené hodnoty ze zkoušky v tahu, tlaku a naměřené tvrdosti HBW 30 jsou pak vypsané v Tab. 10.

Tab. 9 Mechanické vlastnosti odlitků 1A-6A

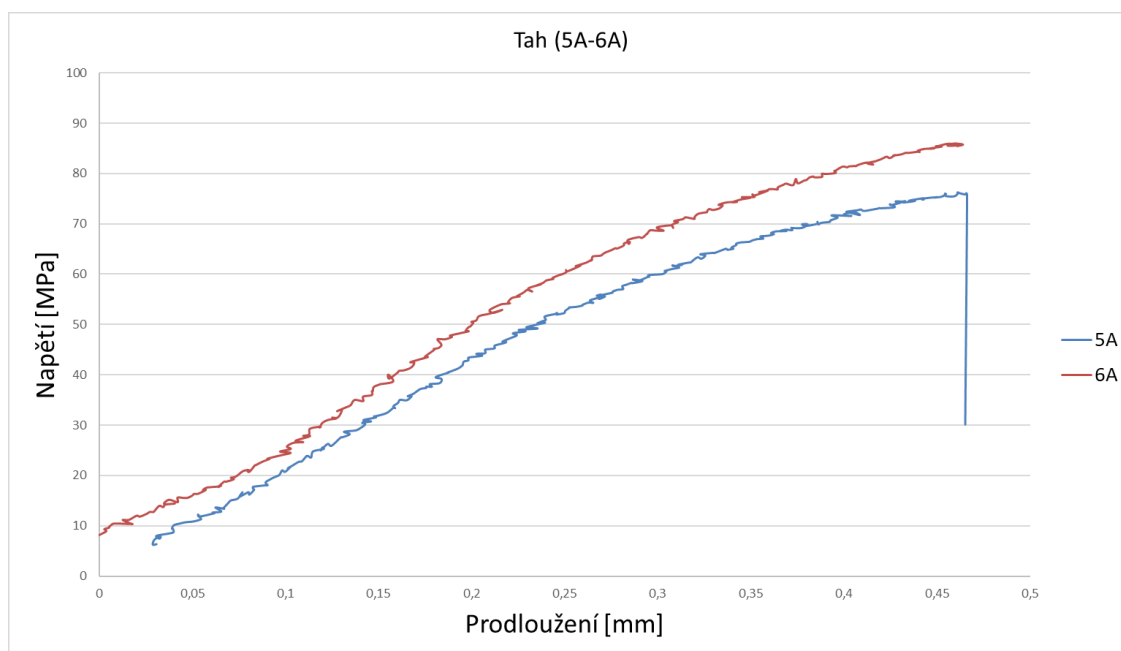
ŘADA A											
Vzorek	C (%)		Si (%)		Desulco (g)	R _m [MPa]	R _{m-tlak} [MPa]	A ₆₀ [%]	HBW 30 [HB]	CEL	SC
	SPE	TA	SPE	TA							
1A	3.09	3.08	1.98	1.84	250	–	532	–	177	3.51	0.847
2A	3.35	3.3	1.99	1.78	80	–	502	–	192	3.72	0.900
3A	3.51	3.53	1.99	1.78	60	–	434	–	198	3.97	0.965
4A	3.64	3.64	2.01	1.98	40	–	325	–	191	4.13	1.008
5A	3.79	3.85	2.01	1.78	30	76	–	0.5	188	4.3	1.052
6A	3.91	3.91	2.03	1.84	20	86	–	0.2	162	4.38	1.073

SPE - spektrální analýza, TA - termická analýza, CEL - ekvivalentní uhlík (TA), SC - stupeň eutektičnosti (TA)

R_m - mez pevnosti v tahu [MPa], R_{m-tlak} - pevnost v tlaku [MPa] A - tažnost [%], HBW 30 - tvrdost dle Brinella [HB]



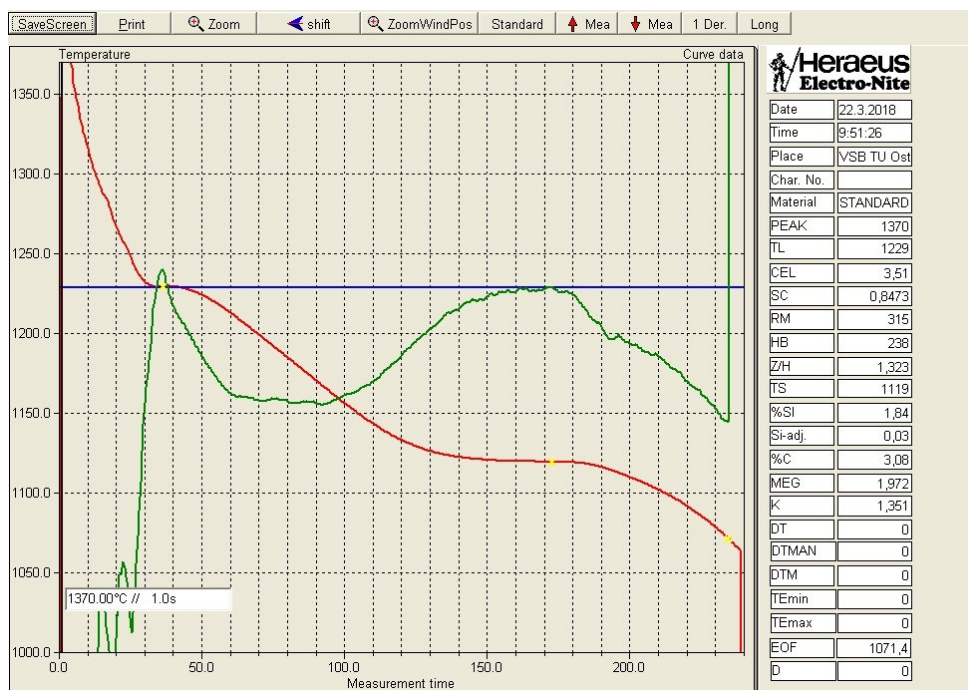
Graf 1 Zkouška tlak: vzorky 1A – 4A



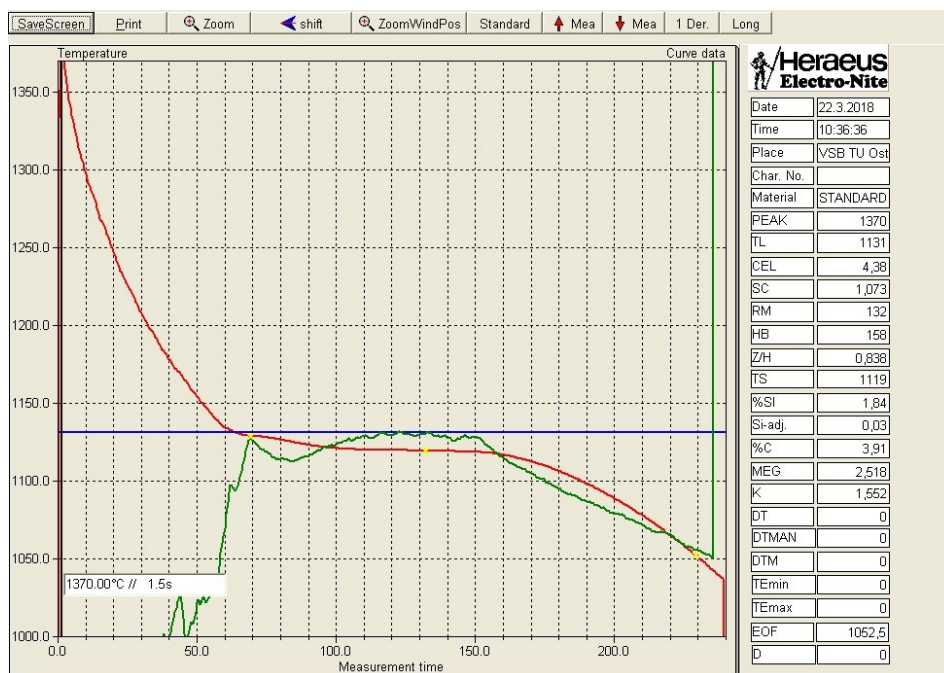
Graf 2 Zkouška tah: vzorky 5A – 6A

6.1.5 Křivky ochlazování

Příklady výsledných křivek ochlazování, z první tavby, vyhodnocené přímo u tavby, jsou na Obr. 34 a 35, ostatní křivky v příloze 7-8. Zelená normální KO, červená derivovaná KO.



Obr. 34 Křivka ochlazování: Vzorek 1A LLG; SC 0,847; C = 3,08%



Obr. 35 Křivka chlazení: Vzorek 6A LLG; SC 1,073; C = 3,91%; $R_m = 86 \text{ MPa}$

6.2 DRUHÁ TAVBA: VZORKY 1B - 6B

Cílem druhé tavby bylo ověřit vliv očkování (pomocí FeSi 75%) spolu s SiC na výslednou strukturu litin. Vyrobeno byly 3 litiny typu LLG a 3 typu LČG. V této tavbě byla použita také ocel AREMA o hmotnosti vsázky 30 kg.

Jako předočkovadlo se použil karbid křemíku SiC v celkovém množství 1050g \rightarrow 1,75% Si, 1,4% C. Složení stejné jako v první tavbě (Tab. 5)

Jako nauhličovadlo se použilo Desulco o stejném složení z předešlé tavby (Tab. 6). Dále se jako očkovadlo použilo FeSi 75%, velikost zrn do 10 mm a jako modifikátor FeSiMg6, velikost zrn do 10 mm, ty byly vloženy do kelímku před vylitím z pece (Obr. 36). Modifikace s očkováním proběhla současně.



Obr. 36 Očkovadlo FeSi 75% (vlevo) a modifikátor FeSiMg6 (vpravo)

V druhé tavbě bylo provedeno šest vylití, vzorky označeny **řadou B**, níže je popsáno množství použitého očkovadla a modifikátoru (Tab.10):

1. LLG s nízkým obsahem stupně sycení \rightarrow 15g FeSi75 0,3%
2. LLG fázově posunutá \rightarrow 10g FeSi75 0,2%
3. LLG \rightarrow 5g FeSi75 0,1%
4. LČG \rightarrow 30g FeSi75 0,6% + 40g FeSiMg6 0,8%
5. LČG \rightarrow 40g FeSi75 0,8% + 50g FeSiMg6 1%
6. LČG \rightarrow 50g FeSi75 1% + 60g FeSiMg6 1,2%

Tab.10 Množství očkovačla a modifikátoru

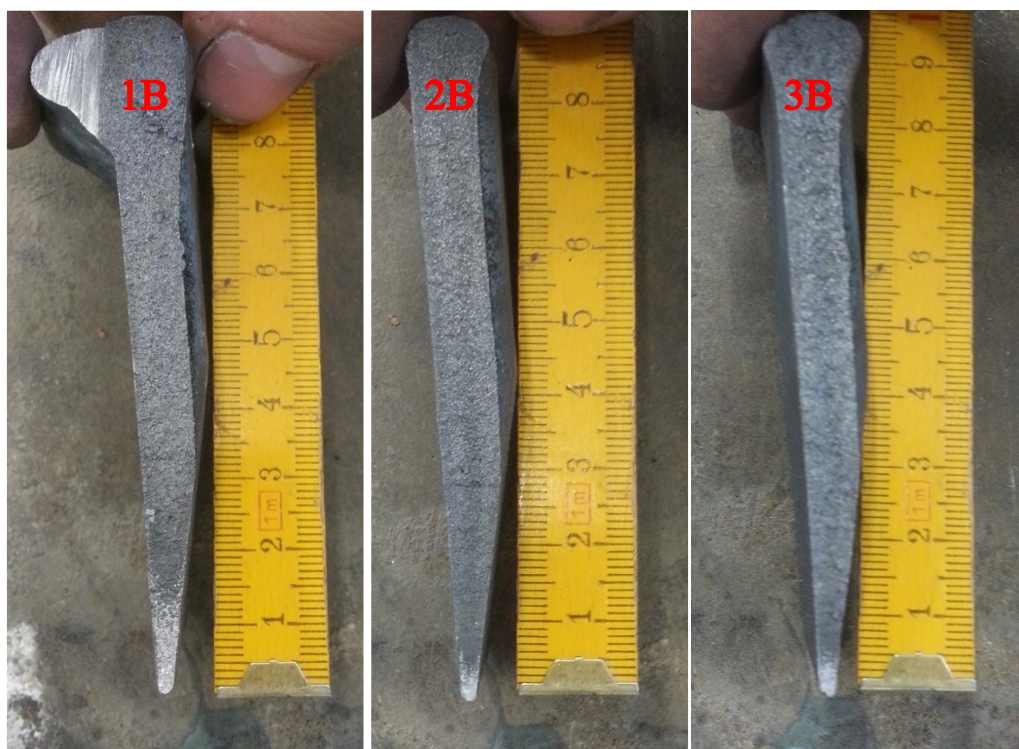
Odlitek	FeSi75	FeSiMg6
1B	0,3% (15g)	–
2B	0,2% (10g)	–
3B	0,1% (5g)	–
4B	0,6% (30g)	0,8% (40g)
5B	0,8% (40g)	1% (50g)
6B	1% (50g)	1,2% (60g)

U všech vylitích se odlily vzorky pro chemickou, termickou analýzu, také tyče pro mechanické zkoušky a vyhodnocení mikrostruktury. Při prvním, druhém a třetím vylití se provedly také zákalkové zkoušky.

6.2.1 Zákalka: vzorky 1B – 3B



Obr. 37 Zákalky vzorků 1B, 2B a 3B



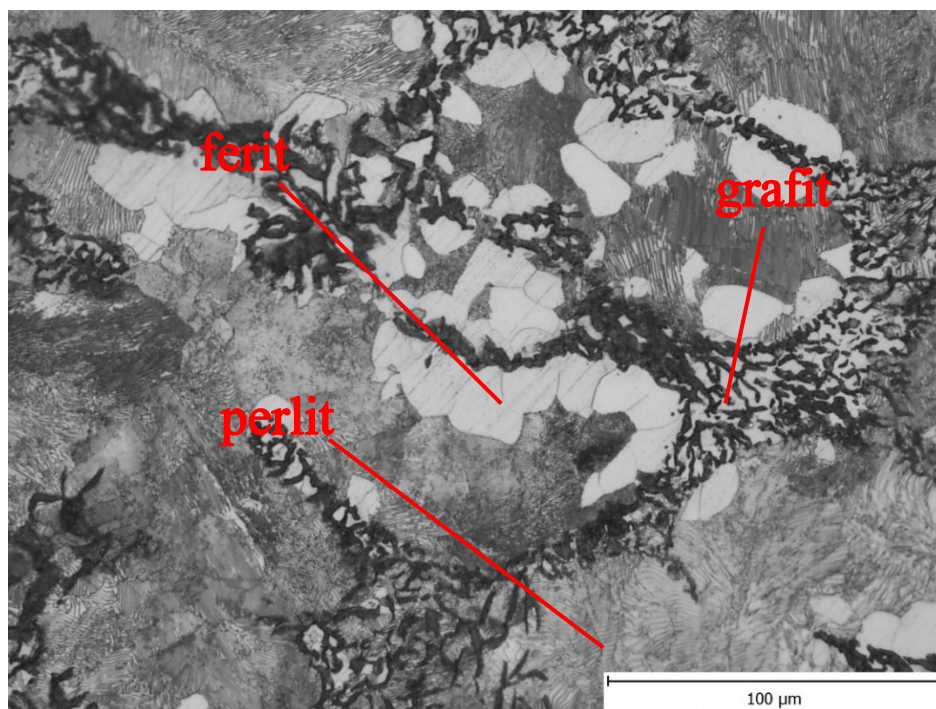
Obr. 38 Výška zákalky vzorku 1B, 2B a 3B

6.2.1.1 Vyhodnocení zákalky

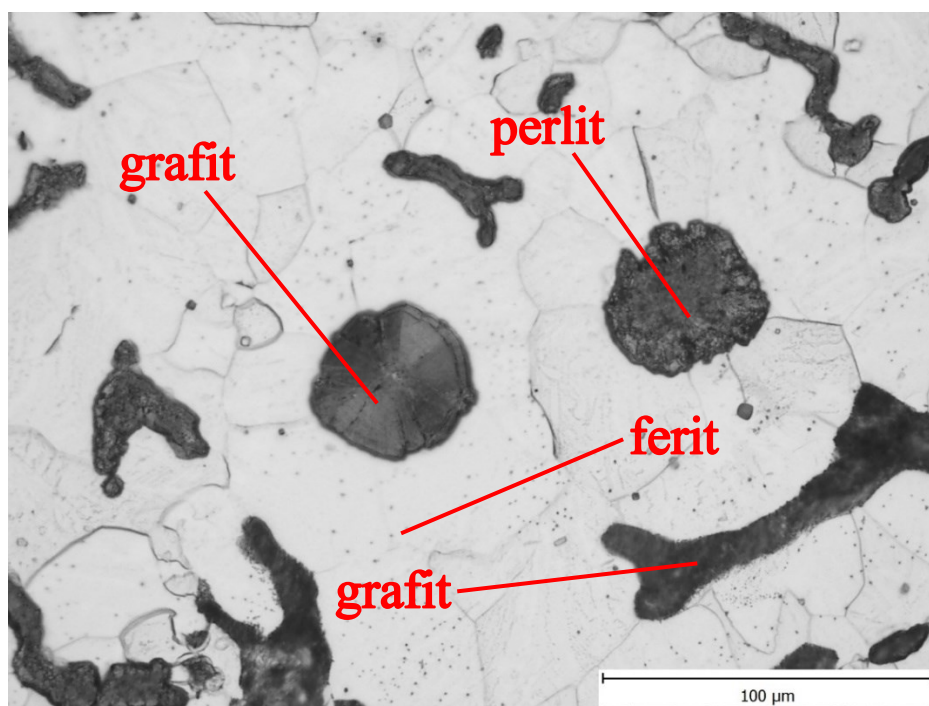
Zmenšení zákalky se projevilo při použití SiC jako předočkovadla a očkovadla FeSi75 (zákalky 1B - 3B) podobně jako v první tavbě. S rostoucím přídávkem očkovadla se zákalka zmenšovala. U vzorků s použitím SiC se zákalka objevuje téměř ve všech případech LLG,

6.2.2 Mikrostruktura: Vzorky 1B – 6B

Pro ukázkou byly vybrány dva vzorky ve 500x zvětšení ze série B (zbytek v příloze 9-14).

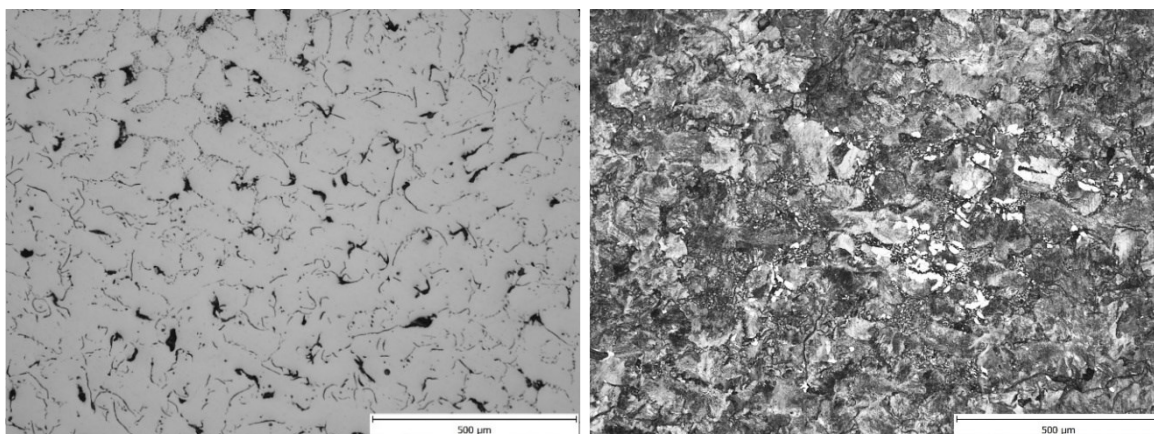


Obr. 39 Vzorek 1B LLG: SC 0,852; FeSi 0,3%; $R_m = 288$ MPa; zvětšeno 500x

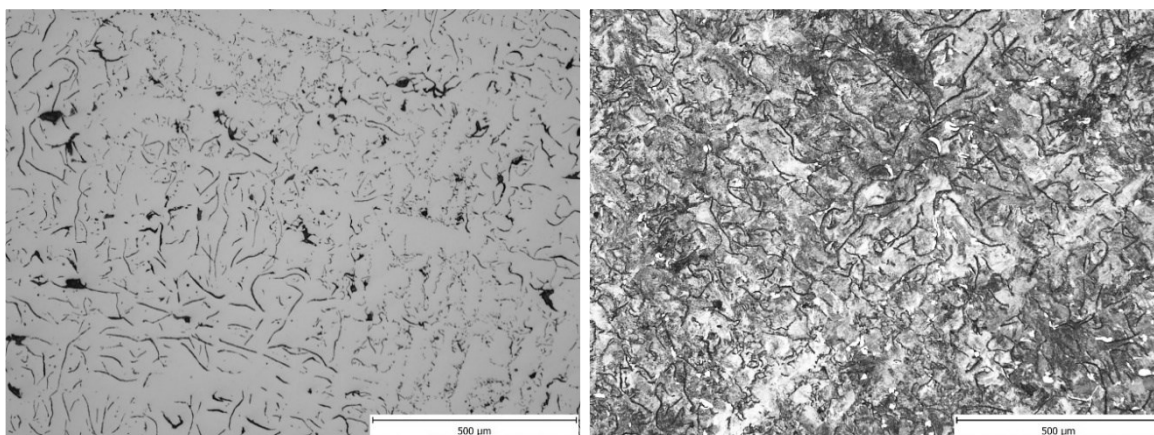


Obr. 40 Vzorek 6B LČG: SC 1,029; FeSi 1%; FeSiMg6 1,2%; $R_m = 391$ MPa; $A = 5,1\%$; zvětšeno 500x

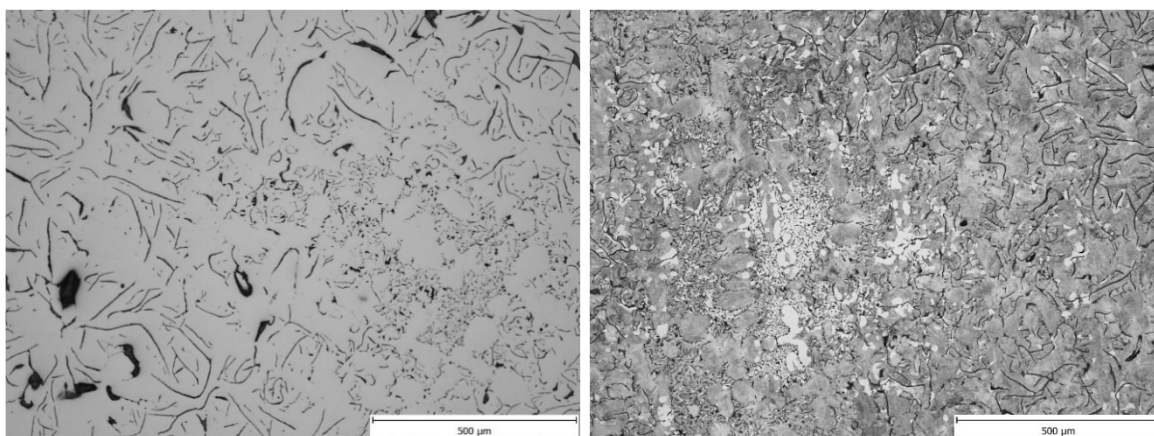
Níže jsou popsány vzorky ve 100x zvětšení, vlevo v leštěném stavu a vpravo leptané.



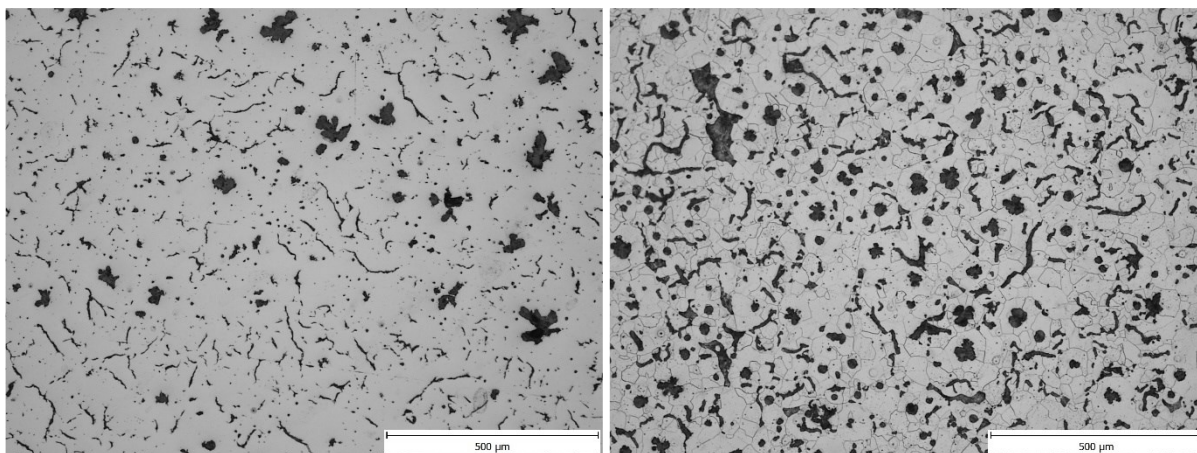
Obr. 41 Vzorek 1B LLG: 60% I A 4 + 40% I D 7 - P 96, Fe 4; SC 0,852; FeSi 0,3%; $R_m = 288$ MPa



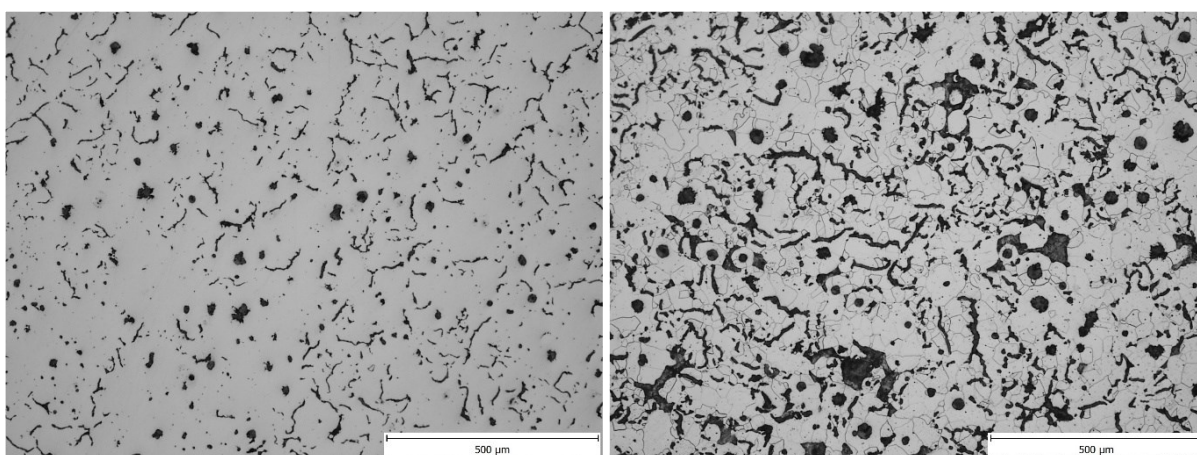
Obr. 42 Vzorek 2B LLG: 60% I A 4 + 40% I D 7 - P 92, Fe 8; SC 0,914; FeSi 0,2%; $R_m = 247$ MPa



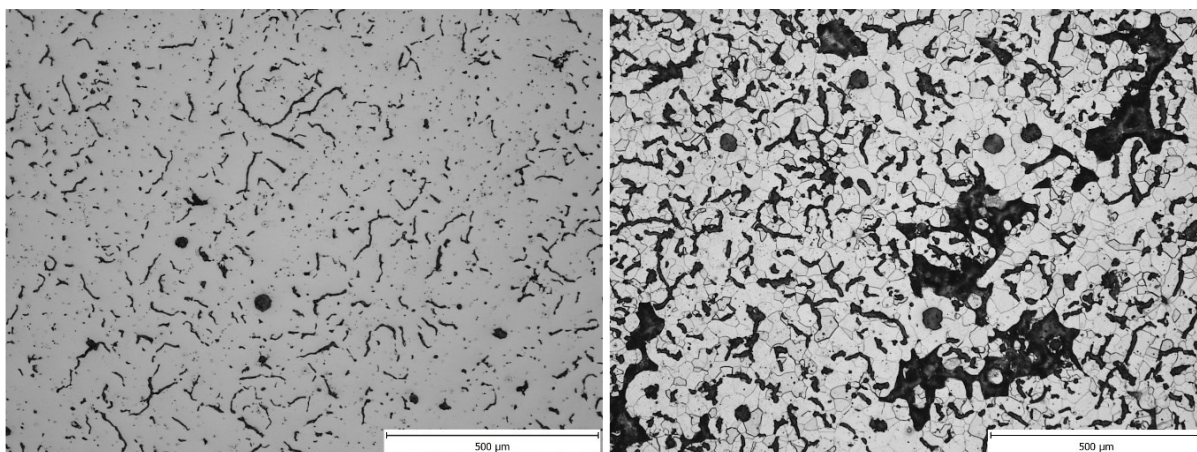
Obr. 43 Vzorek 3B LLG: 60% I D 4 + 40% I C 6 - P 96, Fe 4; SC 1,034; FeSi 0,1%; $R_m = 170$ MPa



Obr. 44 Vzorek 4B LČG: 70% III 4 + 30% V 7 - Fe 94, P 6; SC 1,027; FeSi 0,6%; FeSiMg6 0,8%; $R_m = 358$ MPa; $A = 5,4\%$



Obr. 45 Vzorek 5B LČG: 80% III 4 + 20% V 7 - Fe 94, P 6; SC 1,018; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1%



Obr. 46 Vzorek 6B LČG: 85% III 4 + 15% VI 7 - Fe 80, P 20; SC 1,029; FeSi 1%; FeSiMg6 1,2%; $R_m = 391$ MPa; $A = 5,1\%$

6.2.2.1 Vyhodnocení mikrostruktury

U série B se ve vzorcích 1B-3B vyskytuje grafit typu I A, I D a I C. Složky základní kovové hmoty tvoří perlit s feritem (perlitická matrice) a to hlavně v obsahu 96% perlitu a 4% feritu. Došlo k mírnému zlepšení struktury u LLG, oproti odlitkům série A (rovnoměrnější rozložení grafitu). U vzorku 1B se vyskytuje tzv. mezibuňkový grafit, jedná se o podeutektickou šedou litinu, použilo se zde nejvíc očkovačla. Dále se u vzorků 4B-6B provedlo očkování spolu s modifikací, to zapříčinilo změnu grafitu na III, V a VI. Vyrobeny byly 3 vzorky LČG. U těchto zkušebních odlitků se vyskytuje feritická matrice s perlitem. Grafit je ve větším množství v červíkovitém tvaru, pravidelně zrnitý se vyskytuje ve výrazně menším množství.

6.2.3 Chemická analýza: Vzorky 1B – 6B

V tabulce 11 je uvedeno chemické složení jednotlivých vzorků

Tab. 11 Chemické složení vzorků 1B-6B

ŘADA B											
Vzorek	C (%)		Si (%)		Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mg (%)	CEL	SC
	SPE	TA	SPE	TA							
1B	2.67	3.07	2.28	1.98	0.278	0.023	0.027	0.063		3.53	0.852
2B	3.11	3.3	2.29	1.91	0.278	0.022	0.025	0.061		3.77	0.914
3B	3.34	3.73	2.22	1.98	0.281	0.024	0.027	0.062		4.23	1.034
4B	3.54		2.88		0.294	0.024	0.024	0.070	0.009	4.21	1.027
5B	3.46		3.22		0.296	0.025	0.024	0.070	0.010	4.17	1.018
6B	3.35		3.51		0.302	0.025	0.024	0.070	0.015	4.22	1.029

SPE - spektrální analýza, TA - termická analýza, CEL - ekvivalentní uhlík (TA), SC - stupeň eutektičnosti (TA)

6.2.4 Mechanické zkoušky

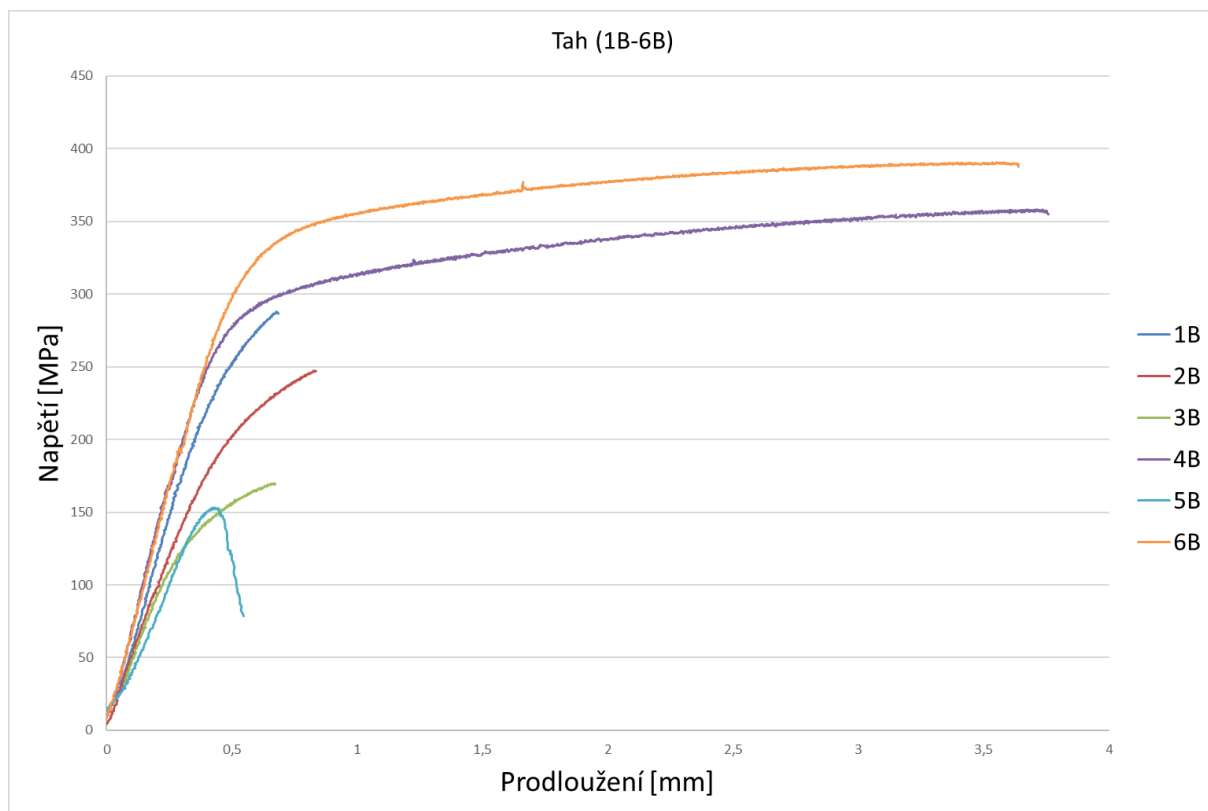
V této tabuli se u všech vzorků provedla zkouška tahem (Graf 3) a naměřena tvrdost, dosažené hodnoty jsou v Tab. 12 (Graf 4). Odlitek 5B se přetrhl hned po začátku měření, hodnoty nebyly naměřeny.

Tab. 12 Mechanické vlastnosti odlitků 1B-6B

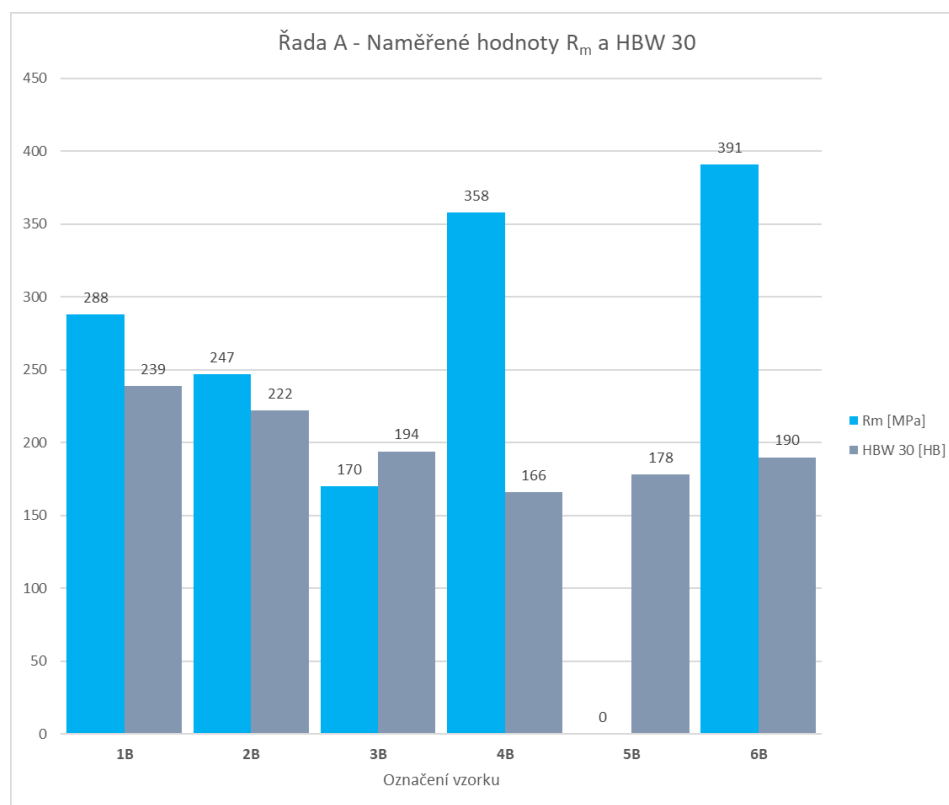
ŘADA B											
Vzorek	C (%)		Si (%)		FeSi75 (%)	FeSiMg6 (%)	R _m [MPa]	A ₆₀ [%]	HBW 30 [HB]	CEL	SC
	SPE	TA	SPE	TA							
1B	2.67	3.07	2.28	1.98	0,3	–	288	0,4	239	3.53	0.852
2B	3.11	3.3	2.29	1.91	0,2	–	247	0,6	222	3.77	0.914
3B	3.34	3.73	2.22	1.98	0,1	–	170	0,5	194	4.23	1.034
4B	3.54	NZ	2.88	NZ	0,6	0,8	358	5,4	166	4.21	1.027
5B	3.46	NZ	3.22	NZ	0,8	1	NZ	NZ	178	4.17	1.018
6B	3.35	NZ	3.51	NZ	1	1,2	391	5,1	190	4.22	1.029

SPE - spektrální analýza, TA - termická analýza, CEL - ekvivalentní uhlík (TA), SC - stupeň eutektičnosti (TA),

R_m - mez pevnosti v tahu [MPa], A₆₀ - tažnost [%], HBW 30 - tvrdost dle Brinella [HB], NZ - nenaměřeno



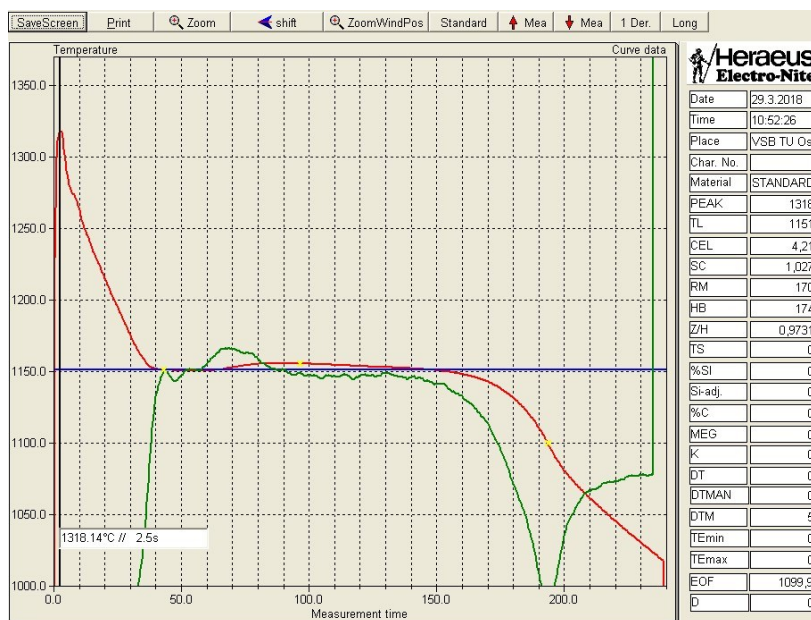
Graf 3 Zkouška tah: vzorky 1B – 6B



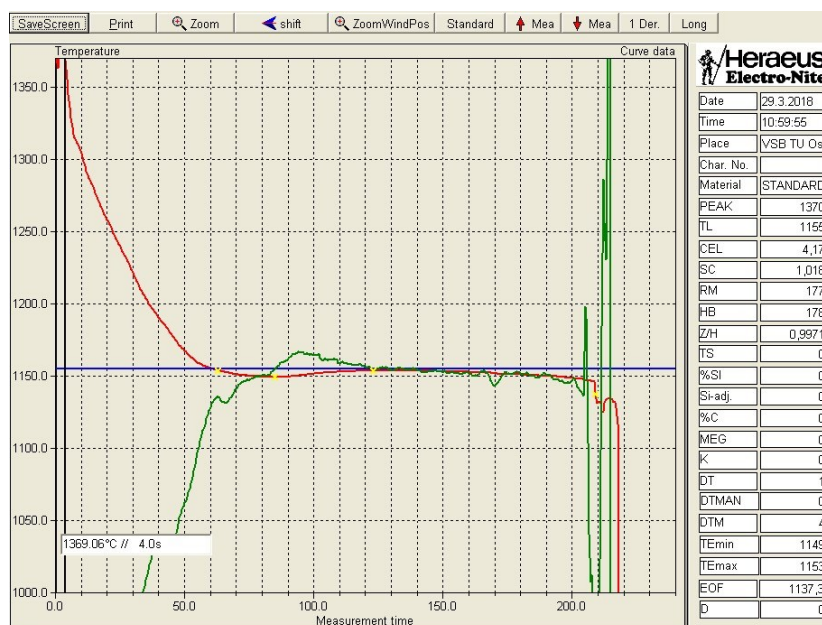
Graf 4 Výsledné hodnoty pevnosti v tahu a tvrdosti, vzorky 1B-6B

6.2.5 Křivky ochlazování

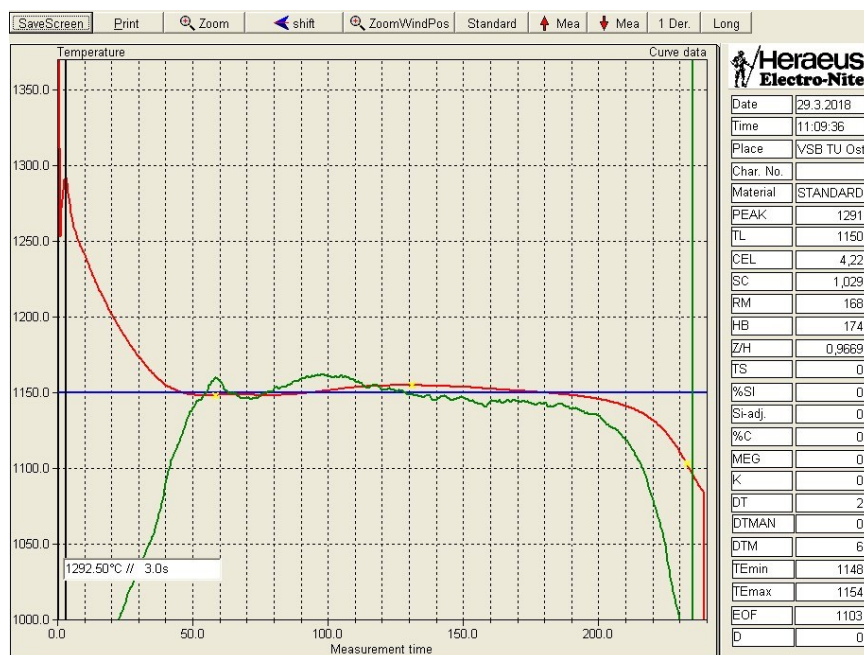
Tři výsledné křivky chladnutí (kelímky bez teluru), z tavby číslo 2, vyhodnocované přímo u tavby, jsou zobrazeny na Obr. 47-49, ostatní jsou v příloze 15-16. Zelená normální KO, červená derivovaná KO.



Obr. 47 Křivka chladnutí: Vzorek 4B LČG; SC 1,027; FeSi 0,6%; FeSiMg6 0,8%; $R_m = 358$ MPa; A = 5,4%; HBW 30 = 166 HB



Obr. 48 Křivka chladnutí: Vzorek 5B LČG; SC 1,018; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1%; HBW 30 = 178 HB



Obr. 49 Křivka chladnutí: Vzorek 6B LČG; SC 1,029; FeSi 1%; FeSiMg6 1,2%; $R_m = 391$ MPa; $A = 5,1\%$ HBW 30 = 190 HB

6.3 TŘETÍ TAVBA: VZORKY 1C - 6C

Smyslem této tavy bylo porovnat LLG, LČG a LKG vyrobené standardně, bez použití SiC. Vsázkový materiál jako v předešlých tavnách ocel AREMA. Při této tavně nebyl použit karbid křemíku SiC. Odlito bylo po 2 vzorcích LLG, LČG a LKG.

Jak již bylo uvedeno, nebyl použit SiC. K očkovaní se použilo ferosilicium FeSi 75% a k modifikaci modifikátor Bjomet8 (FeSiMg6). Jako zásyp se uplatnily kovové třísky, z šedé litiny.

V třetí tavně bylo provedeno šest vylití, označení **řada C**, množství použitého očkovačla a modifikátoru je znázorněno v Tab. 13:

1. LLG → Desulco + 20g FeSi75 0,4%
2. LLG → douhličení, Desulco + 40g FeSi75 0,8%
3. LČG → 60g FeSiMg6 1,2% + 40g FeSi75 0,8%
4. LČG → 70g FeSiMg6 1,4% + 50g FeSi75 1%
5. LKG → 80g FeSiMg6 1,6% + 50g FeSi75 1%
6. LKG → 90g FeSiMg6 1,8% + 50g FeSi75 1%

Jako v předešlých tavných se odlilo 6 tyčí pro mechanické zkoušky a metalografické výbrusy. Kromě vzorku 5C se provedla u všech ostatních termická analýza. Dále vzorky pro chemickou analýzu a 3 zákalky (zákalky 1C - 3C)

Tab. 13 Množství použitého očkovačla a modifikátoru

Odlitek	FeSi75	FeSiMg6
1C	0,4% (20g)	–
2C	0,8% (40g)	–
3C	0,8% (40g)	1,2% (60g)
4C	1% (50g)	1,4% (70g)
5C	1% (50g)	1,6% (80g)
6C	1% (50g)	1,8% (90g)

6.3.1 Zákalka: vzorky 1C – 2C



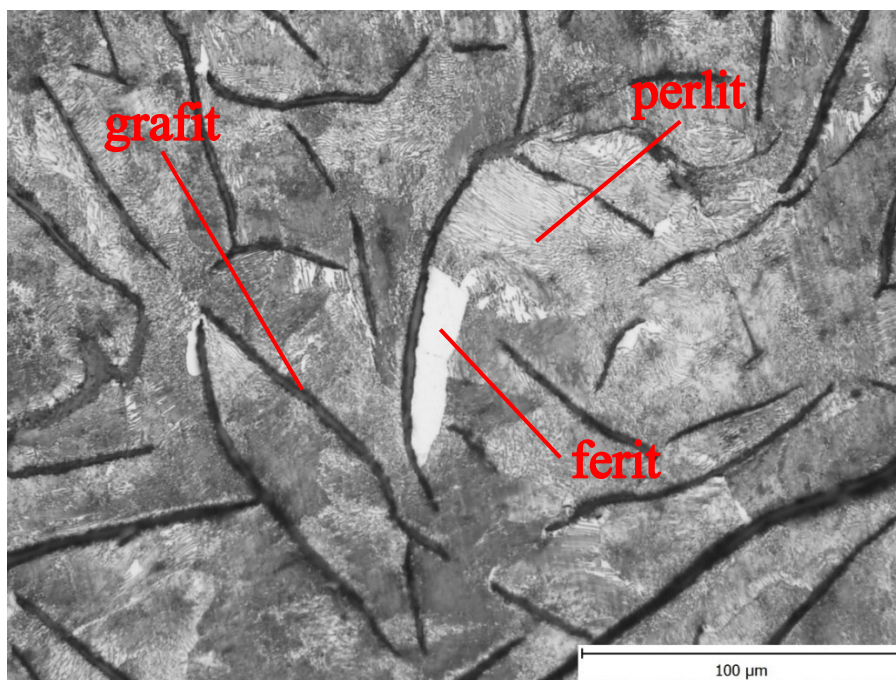
Obr. 50 Zákalka vzorku 1C a 2C

6.3.1.1 Vyhodnocení zákalky

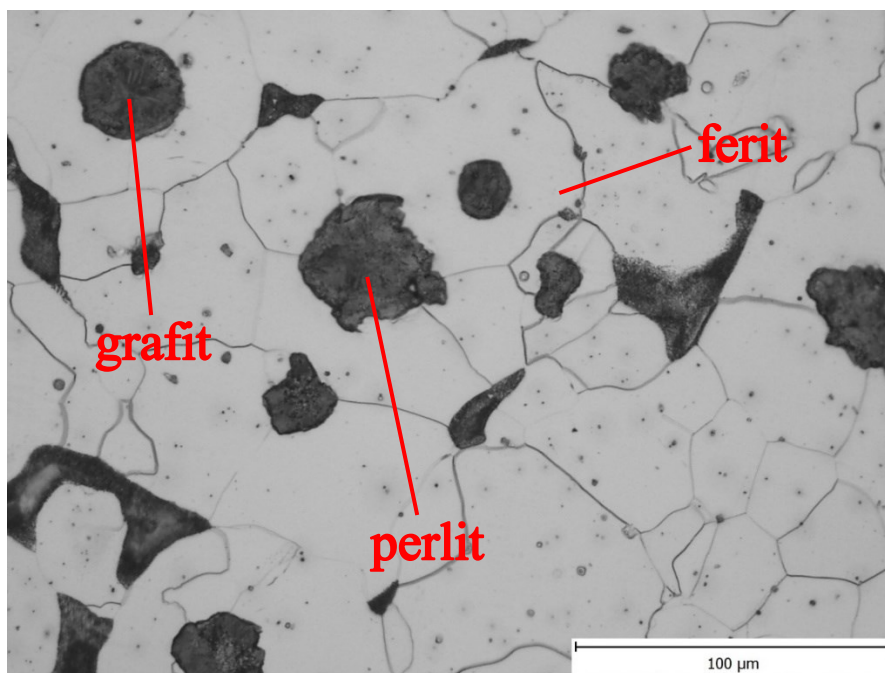
U vzorků 1C a 2C, při stejném obsahu %C (s porovnáním zákalky u odlitku 3A-4A), bez použití SiC (použilo se FeSi75) byla zákalka minimální.

6.3.2 Mikrostruktura: Vzorky 1C – 6C

Pro ukázkou byly vybrány dva vzorky ve 500x zvětšení ze série C (ostatní vzorky příloha 17-22).

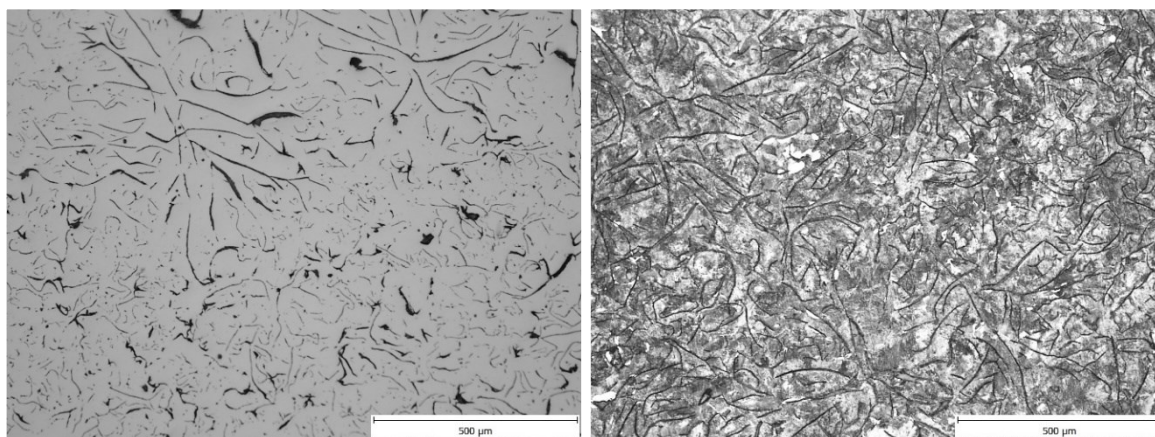


Obr. 51 Vzorek 1C LLG: 60% I D 6 + 40% I C 4 - P 96, Fe 4; SC 0,854; FeSi 0,4%; $R_m = 163 \text{ MPa}$; zvětšeno 500x

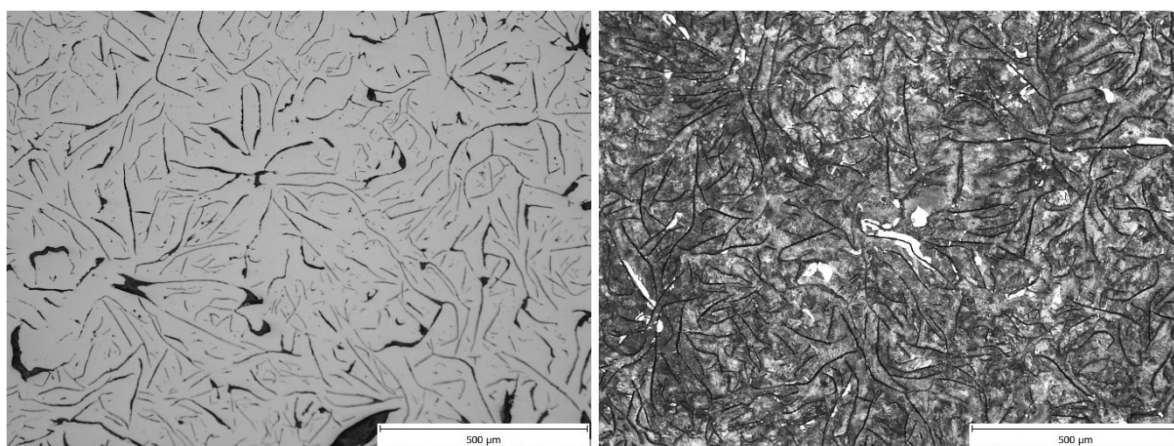


Obr. 52 Vzorek 5C LKG: 40% V 5 + 40% VI 5 + 20% III 5 - Fe 94, P 6; FeSi 1%; FeSiMg6 1,6%; $R_m = 548 \text{ MPa}$; $A = 10,2\%$; zvětšeno 500x

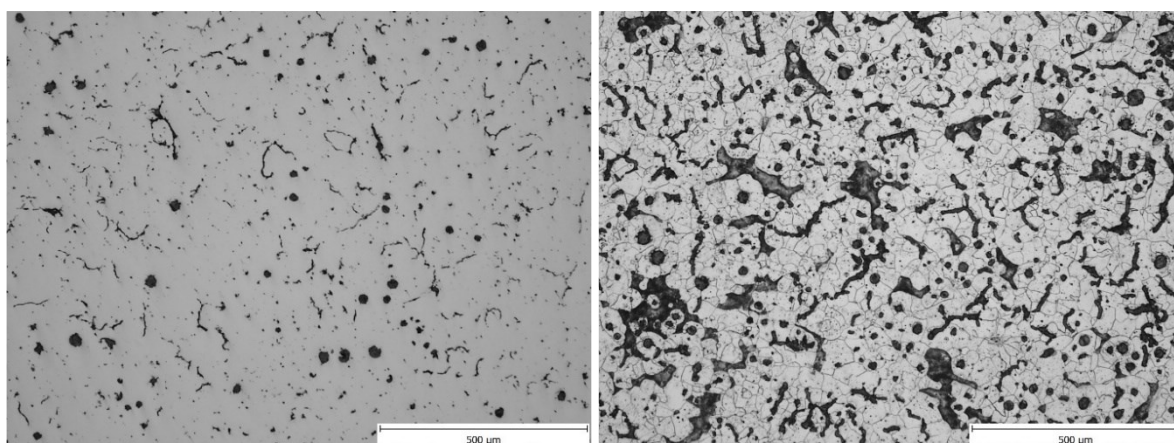
Níže jsou popsány vzorky ve 100x zvětšení, vlevo v leštěném stavu a vpravo leptané.



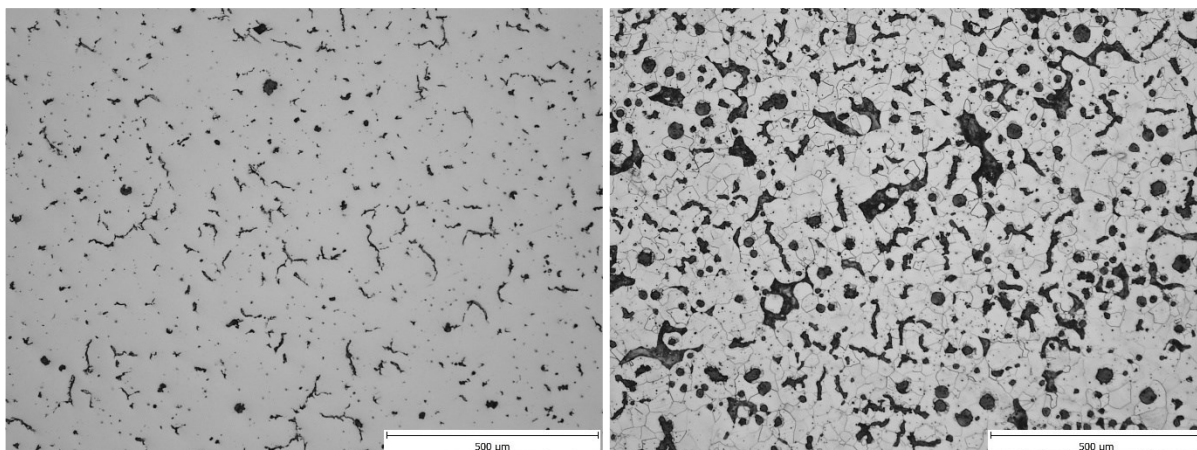
Obr. 53 Vzorek 1C LLG: 60% ID 6 + 40% IC 4 - P 96, Fe 4; SC 0,854; FeSi 0,4%; $R_m = 163 \text{ MPa}$



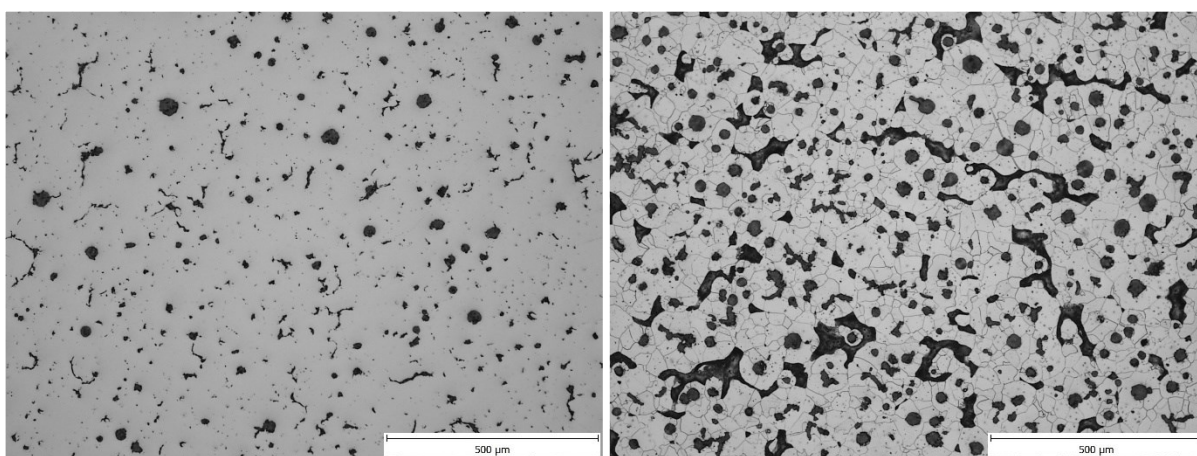
Obr. 54 Vzorek 2C LLG: 80% IA 6 + 20% IC 6; - P 96, Fe 4; SC 0,96; FeSi 0,8%; $R_m = 142 \text{ MPa}$



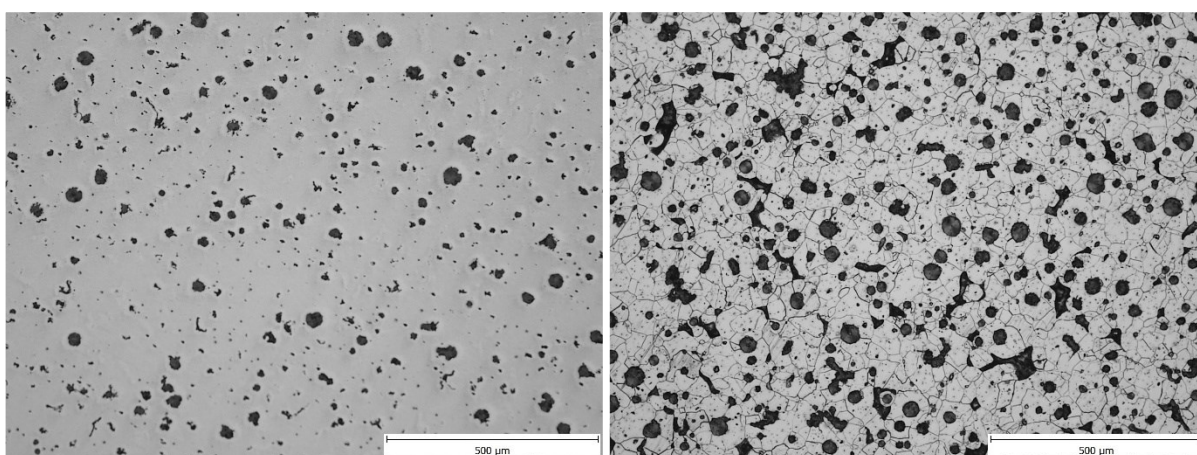
Obr. 55 Vzorek 3C LČG: 70% III 4 + 20% V 6 - Fe 80, P 20; SC 0,997; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1,2%; $R_m = 415 \text{ MPa}$; $A = 6,2\%$



Obr. 56 Vzorek 4C LČG: 75% III 4 + 25% V 5 - Fe 94, P 6; SC 1,004; FeSi 1%; FeSiMg6 1,4%; $R_m = 489$ MPa; $A = 8,8\%$



Obr. 57 Vzorek 5C LKG: 40% V 5 + 40% VI 5 + 20% III 5 - Fe 94, P 6; FeSi 1%; FeSiMg6 1,6%; $R_m = 548$ MPa; $A = 10,2\%$



Obr. 58 Vzorek 6C LKG: 80% VI 5 + 20% V 5 - Fe 94, P 6; SC 0,978; FeSi 1%; FeSiMg6 1,8%

6.3.2.1 Vyhodnocení mikrostruktury

V sérii C se nepoužil karbid křemíku, ale jen očkovaadlo FeSi75 a modifikátor FeSiMg6. U odlitků z LLG (1C a 2C) nebyla provedena modifikace, jen očkování pomocí FeSi75. U těchto vzorků se nachází grafit lupínkový, u 1C ve smíšeném rozložení a u vzorku 2C se již vyskytuje grafit typu I A. Matrice perlitická s feritem. Pro další odlitky již očkování a modifikace provedena byla. Vzorky 3C – 4C obsahují ve značné míře grafit typu III, ale vyskytuje se zde i grafit typu V. Matrice je feritická s perlitem. Obsah feritu se pohybuje kolem 80%, perlitu 20%. Zkušební odlitek 5C, zde začíná převažovat výskyt grafitu typu V a VI, nicméně je zde stále v menší míře grafit typu III. Matrice také feritická. Obsah feritu 94% a perlitu 6%. Odlitek 6C, obsahuje ve značné míře grafit typu VI. Matrice feritická s perlitem. Obsah feritu 94%, perlitu 6%. Dosažené struktury odpovídají provedenímu dávkování očkovaadla a modifikátoru.

6.3.3 Chemická analýza: Vzorky 1C – 6C

V tabulce 14 je uvedeno chemické složení jednotlivých vzorků

Tab. 14 Chemické složení vzorků z třetí tavby 1C-6C

ŘADA C											
Vzorek	C (%)		Si (%)		Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mg (%)	CEL	SC
	SPE	TA	SPE	TA							
1C	3.62	3.09	2.54	1.91	0.298	0.022	0.022	0.062		3.54	0.854
2C	3.62	3.48	2.86	1.91	0.295	0.021	0.022	0.062		3.95	0.96
3C	3.46		3.06		0.301	0.023	0.020	0.076	0.018	4.09	0.997
4C	3.33		3.74		0.301	0.022	0.017	0.072	0.024	4.12	1.004
5C	3.26		4.06		0.307	0.025	0.022	0.078	0.043		
6C	3.11		4.16		0.309	0.024	0.022	0.086	0.043	4.02	0.978

SPE - spektrální analýza, TA - termická analýza, CEL - ekvivalentní uhlík (TA), SC - stupeň eutektičnosti (TA)

6.3.4 Mechanické zkoušky

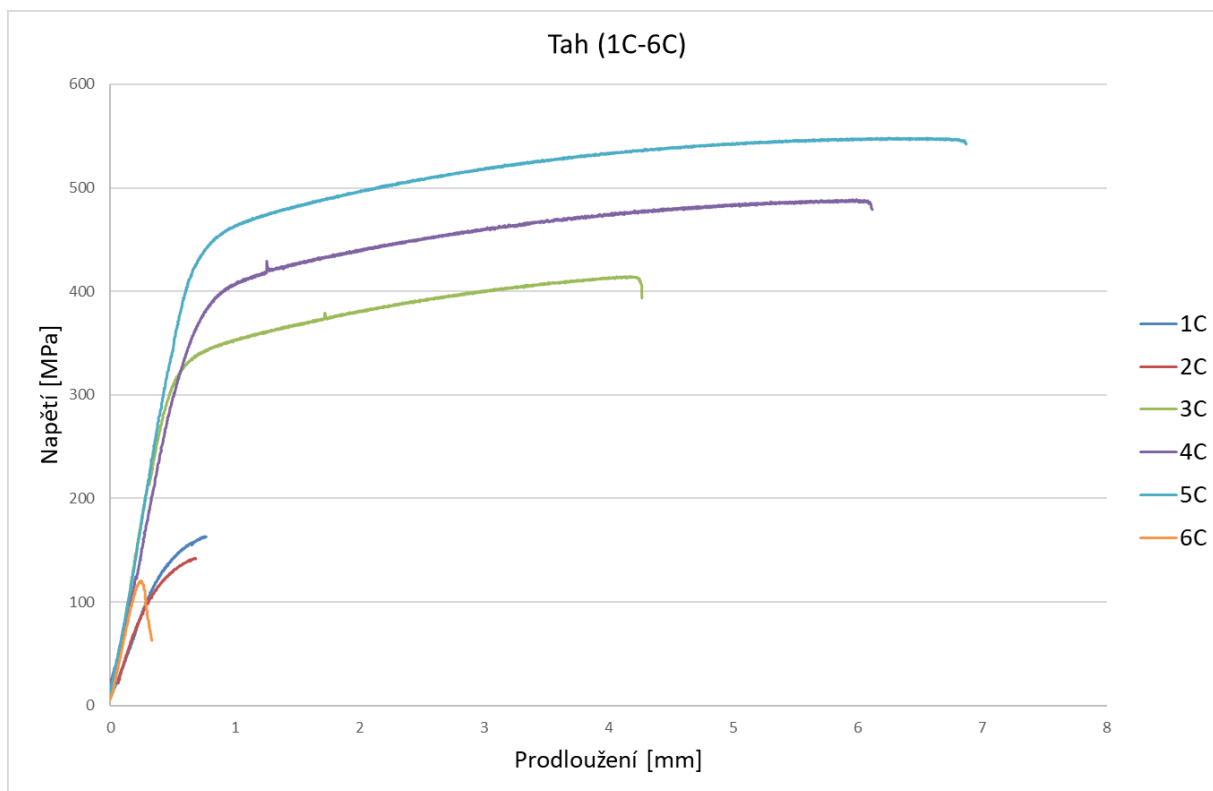
V třetí tavbě byla provedena u všech šesti vzorků tahová zkouška (Graf č.5, 6 a Tab. 15) a naměřená tvrdost. U zkušební tyče 6C došlo k přetržení po začátku tahové zkoušky.

Tab. 15 Mechanické vlastnosti odlitků 1C-6C

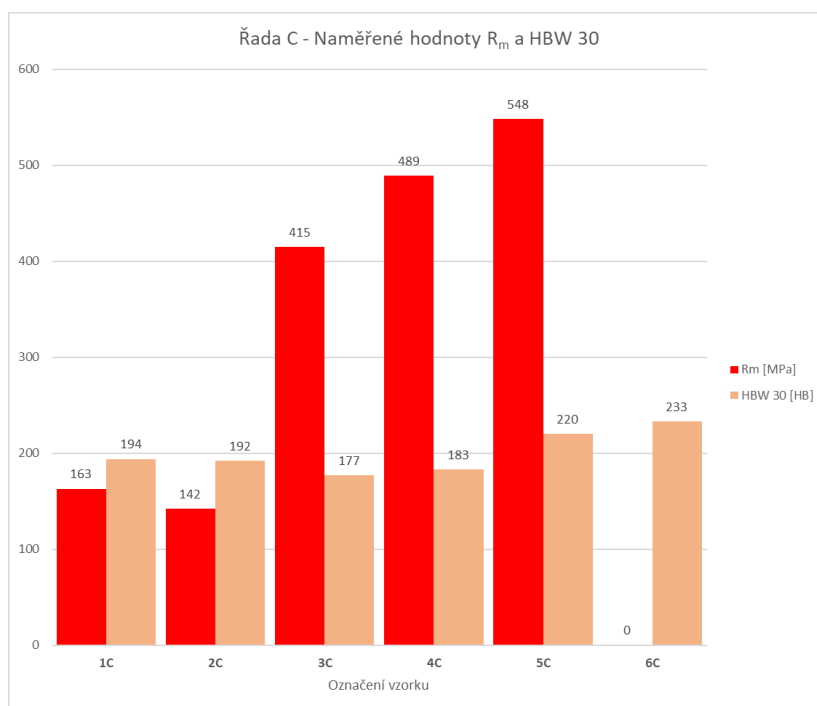
ŘADA C											
Vzorek	C (%)		Si (%)		FeSi75 (%)	FeSiMg6 (%)	R _m [MPa]	A ₆₀ [%]	HBW 30 [HB]	CEL	SC
	SPE	TA	SPE	TA							
1C	3.62	3.09	2.54	1.91	0,4	–	163	0,5	194	3.54	0.854
2C	3.62	3.48	2.86	1.91	0,8	–	142	0,5	192	3.95	0.96
3C	3.46	NZ	3.06	NZ	0,8	1,2	415	6,2	177	4.09	0.997
4C	3.33	NZ	3.74	NZ	1	1,4	489	8,8	183	4.12	1.004
5C	3.26	NZ	4.06	NZ	1	1,6	548	10,2	220	NZ	NZ
6C	3.11	NZ	4.16	NZ	1	1,8	NZ	NZ	233	4.02	0.978

SPE - spektrální analýza, TA - termická analýza, CEL - ekvivalentní uhlík (TA), SC - stupeň eutektičnosti (TA)

R_m - mez pevnosti v tahu [MPa], A₆₀ - tažnost [%], HBW 30 - tvrdost dle Brinella [HB], NZ - nenaměřeno



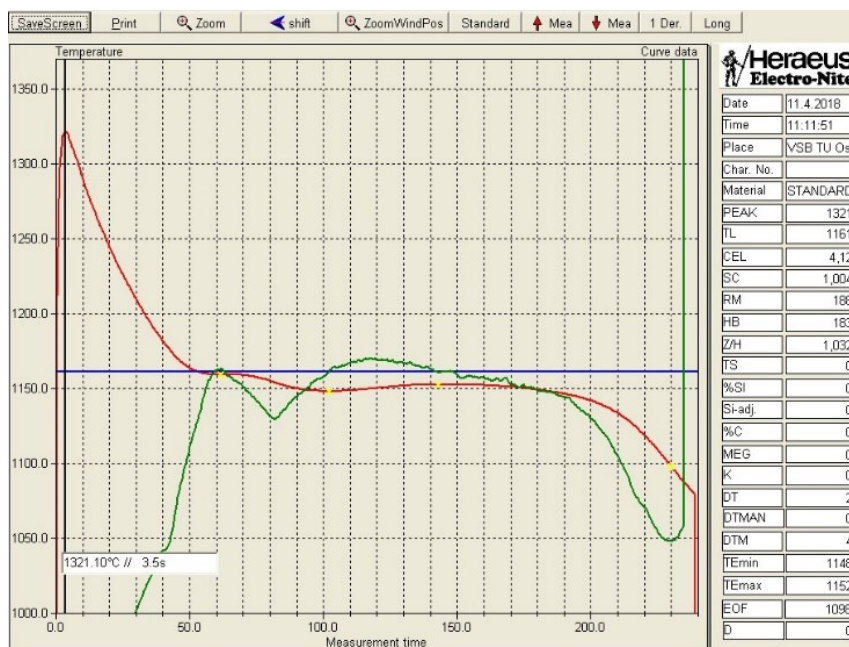
Graf 5 Zkouška tah: vzorky 1C – 6C



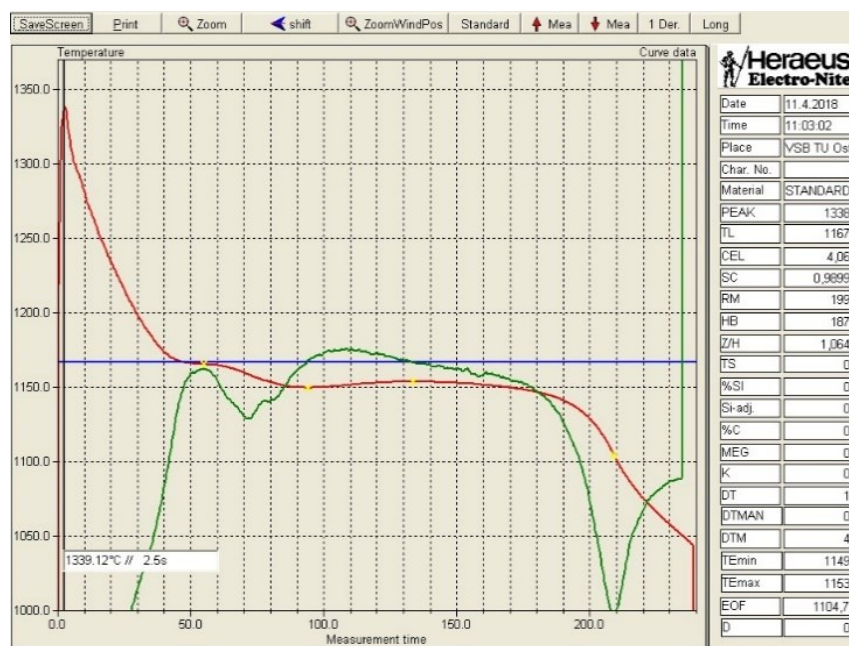
Graf 6 Výsledné hodnoty pevnosti v tahu a tvrdosti, vzorky 1C – 6C

6.3.5 Křivky ochlazování

Tři výsledné křivky chladnutí (bez teluru), z tavby číslo 3, vyhodnocované přímo u tavby, jsou zobrazeny na Obr. 59 - 61, ostatní křivky ochlazování jsou v přílohách 23-24. U odlitku 5C termická analýza provedená nebyla. Zelená normální KO, červená derivovaná KO.



Obr. 59 Křivka chladnutí: Vzorek 3C LČG; SC 0,997; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1,2%; $R_m = 415$ MPa; $A = 6,2\%$; HBW 30 = 177 HB



Obr. 60 Křivka chladnutí: Vzorek 4C LČG; SC 1,004; FeSi 1%; FeSiMg6 1,4%; $R_m = 489$ MPa; $A = 8,8\%$; HBW 30 = 183 HB



Obr. 61 Křivka chladnutí: Vzorek 6C LKG; SC 0,978; FeSi 1%; FeSiMg6 1,8%; HBW 30 = 233 HB

ZÁVĚR

Cílem práce bylo popsat účinky karbidu křemíku (SiC) na krystalizaci „syntetických“ litin. Všechny tavby byly vyrobeny jako tzv. „syntetické“ litiny typu LLG, LČG a LKG. V první tavně (LLG, vz. 1A-6A) se použil jen karbid křemíku (SiC) spolu s nauhličovadlem (Desulco) a zkoumal se tak vliv na výslednou strukturu litin typu LLG a jejich vlastnosti. V druhé tavně (vz. 1B-6B) se odlily tři vzorky LLG a tři LČG. U odlitků vz. 1B-3B (LLG) se spolu s SiC použilo očkovadlo FeSi75, u dalších tří odlitků (LČG) i s použitím modifikátoru FeSiMg6. Ve třetí tavně (1C-6C), se místo SiC, použilo očkovadlo FeSi75, pro porovnání s tavnami zpracovanými SiC. Odlity byly dvě varianty LLG, LČG a LKG. U všech odlitých vzorků se provedly metalografické rozbor, chemická a termická analýza i vybrané mechanické zkoušky. U LLG se provedly také zákalkové zkoušky.

Z vyhodnocených zákalkových zkoušek je patrné, že s rostoucím obsahem uhlíku se zákalka (metastabilní struktura bez vyloučeného grafitu) zmenšuje (Obr. 23, zákalky 1A - 6A). Taktéž se toto zmenšení projevilo při použití SiC jako předočkovadla a očkovadla FeSi75 (Obr. 38, zákalky 1B - 3B). S rostoucím přídatkem očkovadla se zákalka zmenšovala. U vzorků s použitím SiC se zákalka objevuje téměř ve všech případech LLG, naproti tomu u vzorků 1C a 2C, při stejném obsahu %C, bez použití SiC (použilo se FeSi 75) byla zákalka minimální.

Mikrostruktury **série A** (tavby zpracované SiC - bez očkování FeSi75), odpovídají neočkované litině - převažuje výskyt mezidendritického grafitu. Grafit se nevyskytuje jako typ I A, ale pouze jako grafit typu I C, I E a I D (viz. obr. 28 - 33).

V **sérii B** došlo k mírnému zlepšení mikrostruktury u odlitků LLG, oproti odlitkům série A, u vzorků 2B-3B rovnoměrnější rozložení grafitu (výskyt grafitu I A), matrice perlitická. U vzorku 1B se vyskytuje tzv. mezibuňkový grafit, jedná se o podeutektickou šedou litinu, použilo se zde nejvíce očkovadla. Dále se u vzorků 4B-6B provedlo očkování spolu s modifikací, to zapříčinilo změnu grafitu na červíkovitý (III) a zrnitý (V, VI). Grafit je u 4B-6B ve větším množství (70-80%) v červíkovitém tvaru, pravidelně zrnitý se vyskytuje ve výrazně menším množství (viz. Obr. 41 - 46).

V **sérii C** u odlitků z LLG (1C a 2C) nebyla provedena modifikace, jen očkování LLG pomocí FeSi75. U těchto vzorků se nachází grafit lupínkový, u 1C grafit typu I D 60% a u vzorku 2C se již vyskytuje grafit typu I A 80 %. Matrice perlitická s feritem. Pro další odlitky

již očkování a modifikace provedena byla. Vzorky 3C – 4C obsahují ve značné míře grafit typu III 70-75%, ale vyskytuje se zde i 20-25% grafitu typu V. Matrice je feritická s perlitem. Zkušební odlitek 5C, zde začíná převažovat výskyt grafitu typu V 40% a 40 % VI, nicméně je zde stále v menší míře 20% grafitu typu III. Matrice také feritická. Odlitek 6C, obsahuje 80% grafitu typu VI. Dosažené struktury v sérii C odpovídají dávkování očkovadla a modifikátoru (viz. Obr. 53 - 58).

Z výše popsaných metalografických rozborů a vyhodnocení bylo zjištěno, že samotný SiC nezaručil požadovanou strukturu litiny. Zkušební odlitky série C (vyrobeny standardně) obsahovaly u LLG požadovaný grafit typu I A a u LKG grafit typu V, VI.

Mechanické zkoušky, zkouška tlakem se provedla u vzorků 1A - 4A a zkouška tahem proběhla u všech zbývajících. V **sérii A** dosahovaly (zkouška v tlaku 1A - 4A) maximální hodnoty 1A ($R_{m-tlak} = 532$ MPa) se zvýšeným obsahem %C se pak u 2A - 4A postupně snižovaly (viz. Tab. 9), u 4A ($R_{m-tlak} = 325$ Mpa). U vzorku 5A, již podrobeného zkoušce tahem, byla naměřena $R_m = 76$ MPa, u 6A $R_m = 86$ MPa. Bez použití očkovadla (5A - 6A) byla mez pevnosti odpovídající neočkováným LLG. Největší tvrdosti (viz. Tab. 9) bylo dosaženo u odlitku 3A HBW = 198 HB, nejmenší u 6A HBW = 162 HB.

V **sérii B** byla naměřena u LLG vzorku 1B - 3B hodnota $R_m = 288$ (1B) k 170 Mpa (3B), se zmenšujícím množstvím očkovadla FeSi tak pevnost klesala. Odlitky (LČG) 4B - 6B dosahovaly hodnot R_m od 358MPa do 390 MPa a tažnosti A_{60} kolem 5%. Z hlediska tvrdosti byly naměřeny u 1B HBW = 239 HB a 222 HB u 2B. Nejmenší tvrdost byla naměřena u 4B HBW = 166 HB (viz. Tab. 12).

V **sérii C** bylo docíleno hodnot LLG u vzorků 1C $R_m = 163$ MPa a 2C $R_m = 142$ MPa. (viz. Tab. 15) A tak v sérii B bylo ze získaných hodnot patrné, že s použitím SiC (1B-3B) lze dosáhnout spolu s očkováním lepších mechanických vlastností LLG, než u odlitků bez SiC (1C-2C). S použitím FeSi75 u LLG, již odlitky dosahovaly i dvojnásobných hodnot meze pevnosti v tahu R_m oproti odlitkům ze série A. U odlitků z LKG (3C – 5C) byly meze pevnosti R_m od 415 MPa do 548 MPa a tažnosti A_{60} od 6 do 10 %. Vyšší R_m (MPa) a tažnosti A_{60} (%), měly odlitky bez použití SiC (3C-5C), zde však tyto lepší vlastnosti zajistilo i zvýšené množství očkovadla spolu s modifikátorem. Naměřená tvrdost u 1C a 2C se pohybovala kolem 190 HB. Největší tvrdost měl vzorek 6C a to 233 HB, nejmenší 3C HBW = 177 HB (viz. Tab. 15).

Tavby LLG zpracované jen přidáním SiC do vsázky v EIP, bez následného očkovaní FeSi75 při odlévání „syntetické“ LLG, vykazovaly nevhodné (mezidendritické) rozložení lupínkového grafitu a nízké mechanické vlastnosti. Mechanické vlastností LLG zpracované přidáním SiC do vsázky a následně očkované FeSi75 byly vyšší než mechanické vlastnosti standardně vyrobené LLG.

Zpracování litiny přidáním SiC do vsázky je vhodné pro modifikované litiny (LČG a LKG). Při výrobě LČG přidáním SiC do vsázky, modifikací FeSiMg6 s očkováním FeSi75 bylo dosaženo standardních hodnot pevnosti v tahu R_m a tažnosti A_{60} .

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VONDRÁK, V., HAMPL, J., HANUS, A., Metalurgie litin-mimopecní zpracování litiny. VŠB-TU Ostrava, 2005, [cit. 2018-01-05].
- [2] NEUMANN, F. Gusseisen, Renningen-Malmsheim,expert-verlag, 1999, ISBN 3-8169-1728-3. [cit. 2018-02-08]
- [3] OTÁHAL, V., Tvárná litina. Druhé. Brno: *MetalCasting and Foundry Consult*, [online] [cit. 2018-02-03]. Dostupné z WWW: <<http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/litiny/>>.
- [4] ODEHNAL, J., Metalurgické a technologické aspekty odlévání hmotných odlitků ze slitin železa, *Disertační práce*, Ostrava, [online] 2015 [cit. 2018-02-08] Dostupné z WWW: <<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/111288>>.
- [5] EDALATI K., AKHLAGHI F., NILI-AHMADABADI M., Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures. Tehran: *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, [cit. 2018-02-01] Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604008489>>.
- [6] ROUČKA, J., Metalurgie litin. Brno: *FSI forum*. [online]. 1998, [cit. 2018-02-20] Dostupné z WWW: <<http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/database-predmetu/CME/Metalurgie%20litin.pdf>>.
- [7] Melting of Grey Cast Iron Based on Steel Scrap Using Silicon Carbide. Gliwice: *Archives of foundry engineering*. [online]. 2014, [cit. 2018-02-10] Dostupné z WWW: <<http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/3909/melting-of-grey-cast-iron-based-on-steel-scrap-using-silicon-carbide.pdf>>.
- [8] VAŠKO, A., Microstructure and mechanical properties of synthetic nodular cast iron. Žilina: *Archives of foundry engineering*. [online]. 2010, [cit. 2018-02-20] Dostupné z WWW: <<http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/718/microstructure-and-mechanical-properties-of-synthetic-nodular-cast-iron.pdf>>.

- [9] HONG, H., DING, X., WARKENTIN, M., Effect of Mo addition on as-cast microstructures and properties of grey cast irons. *Material Science and Engineering*. [online]. 2017, [cit. 2018-02-28] Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509318301266>>.
- [10] GONZALEZ-MARTINEZ, R., DE LA TORE, U., EBEL, A., LACAZE, J., Effect of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of cast ferritic ductile cast irons. *Material Science and Engineering*. [online]. 2017, [cit. 2018-02-25] Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509317315083>>.
- [11] Grey Cast iron vs. Silicon Carbide. *MakeItFrom.com*. [online]. [cit. 2018-03-12] Dostupné z WWW: <<https://www.makeitfrom.com/compare/Grey-Cast-Iron/Silicon-Carbide-SiC>>.
- [12] Silicon Carbide. *Cometalsa*. [online]. [cit. 2018-03-18] Dostupné z WWW: <<https://www.cometalsa.com/download.php?id=867>>.
- [13] Hodnocení metalografické struktury litin. *Norma ČSN 42 0461*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1975. [cit. 2018-03-01]
- [14] OMRANIAN, P., N. SHAKERI, A. MOHAMMADPOUR, M. KHALILPOUR, N. ALAVI. Use of silicon carbide as an inoculant in ductile iron casting to reduce the cost with keeping the properties. *Metal*. 2013. [online]. [cit. 2018-03-10] Dostupné z WWW: <<http://foundrygate.com/upload/artigos/cwvdHuZP6Rdfod5sCbaSgtTLXI35.pdf>>.
- [15] Resorbent-Produkty. *Resorbent.cz*. [online]. [cit. 2018-03-15] Dostupné z: <<https://www.resorbent.cz/produkty>>
- [16] OTÁHAL, V., Jakostní litiny: Litina s lupínkovým grafitem: výroba-vlastnosti Brno: *MetalCasting and Foundry Consult*, [online]. [cit. 2018-03-25] Dostupné z: <<http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/jakostni-litiny/>>
- [17] REN, F., L. FENGJUN, L. WEIMING, M. ZHANHONG a T. BAOHONG. Effect of inoculating addition on machinability of gray cast iron. *Journal of Rare Earths* [online]. 2009, (27) [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002072108602367>>

POUŽITÉ OBRÁZKY

Obr. 1 Tažnost a mez pevnosti v tahu slévárenských slitin [1].....	3
Obr. 2 Ferrosilicium - FeSi 75%	7
Obr. 3 Karbid křemíku – SiC [15]	8
Obr. 4 Výroba SiC v pecích [3]	10
Obr. 5 Křivka ochlazování litiny 2% Si, 4% C [3].....	12
Obr. 6 Vliv přísady 2% FeSi a SiC do slitiny Fe-C na teplotu taveniny [3].....	13
Obr. 7 Zákalková zkouška – konstantní průřez (vlevo) [6] a klínový průřez (vpravo)...	15
Obr. 8 Tvar grafitu (vlevo) a rozložení grafitu (vpravo, LLG litiny) [13]	18
Obr. 9 Výsledná zkušební tyč pro tahovou zkoušku	19
Obr. 10 Vsázkový materiál – Ocel ČSN 12.013	20
Obr. 11 Forma pro zákalkovou zkoušku.....	21
Obr. 12 Forma pro zkušební tyče.....	21
Obr. 13 Připravené formy.....	22
Obr. 14 Kelímky pro termickou analýzu	22
Obr. 15 Stojánek pro kelímek na termickou analýzu a kokila pro vzorky na chemickou analýzu.....	23
Obr. 16 Odlitek pro tahovou zkoušku a výřez pro metalografii	23
Obr. 17 Odlitek pro zákalkovou zkoušku a pro chemickou analýzu.....	23
Obr. 18 Laboratorní pec - obsah 30kg.....	24
Obr. 19 Tavba v indukční peci	24
Obr. 20 Karbid křemíku	25
Obr. 21 Nauhličovadlo – Desulco	26
Obr. 22 Působení nauhličovadla	27
Obr. 23 Hodnocení zákalky z první tavby 1A-6A	28
Obr. 24 Výška zákalky vzorku 1A ,2A a 3A	28
Obr. 25 Výška zákalky vzorku 4A, 5A a 6A	29
Obr. 26 Vzorek 1A LLG: 70% I E 4 + 30% I E 5 - P 70, Fe 30; SC 0,847; C = 3,08%; zvětšeno 500x.....	30
Obr. 27 Vzorek 5A LLG: I C 4 - P 92, Fe 8; SC 1,052; C = 3,85%; R _m = 76 MPa; zvětšeno 500x.....	30
Obr. 28 Vzorek 1A LLG: 70% I E 4 + 30% I E 5 - P 70, Fe 30; SC 0,847; C = 3,08% ...	31
Obr. 29 Vzorek 2A LLG: I E 5 - P 85, Fe 15; SC 0,900; C = 3,3%.....	31
Obr. 30 Vzorek 3A LLG: I E 5 + I D 4 - P 85, Fe 15; SC 0,965; C = 3,53%	31
Obr. 31 Vzorek 4A LLG: 50% I C 5 + 50% D 4 - P 92, Fe 8; SC 1,008; C = 3,64%	32
Obr. 32 Vzorek 5A LLG: I C 4 - P 92, Fe 8; SC 1,052; C = 3,85%; R _m = 76 MPa	32
Obr. 33 Vzorek 6A LLG: 80% I C 6 + 20% I E 4 - P 92, Fe 8; SC 1,073; C = 3,91%; R _m = 86 MPa.....	32

Obr. 34 Křivka ochlazování: Vzorek 1A LLG; SC 0,847; C = 3,08%.....	35
Obr. 35 Křivka chladnutí: Vzorek 6A LLG; SC 1,073; C = 3,91%; R _m = 86 MPa	35
Obr. 36 Očkovadlo FeSi 75% (vlevo) a modifikátor FeSiMg6 (vpravo)	36
Obr. 37 Zákalky vzorků 1B, 2B a 3B.....	37
Obr. 38 Výška zákalky vzorku 1B, 2B a 3B	38
Obr. 39 Vzorek 1B LLG: SC 0,852; FeSi 0,3%; R _m = 288 MPa; zvětšeno 500x.....	39
Obr. 40 Vzorek 6B LČG: SC 1,029; FeSi 1%; FeSiMg6 1,2%; R _m = 391 MPa; A = 5,1%; zvětšeno 500x.....	39
Obr. 41 Vzorek 1B LLG: 60% I A 4 + 40% I D 7 - P 96, Fe 4; SC 0,852; FeSi 0,3%; R _m = 288 MPa.....	40
Obr. 42 Vzorek 2B LLG: 60% I A 4 + 40% I D 7 - P 92, Fe 8; SC 0,914; FeSi 0,2%; R _m = 247 MPa	40
Obr. 43 Vzorek 3B LLG: 60% I D 4 + 40% I C 6 - P 96, Fe 4; SC 1,034; FeSi 0,1%; R _m = 170 MPa	40
Obr. 44 Vzorek 4B LČG: 70% III 4 + 30% V 7 - Fe 94, P 6; SC 1,027; FeSi 0,6%; FeSiMg6 0,8%; R _m = 358 MPa; A = 5,4%.....	41
Obr. 45 Vzorek 5B LČG: 80% III 4 + 20% V 7 - Fe 94, P 6; SC 1,018; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1%.....	41
Obr. 46 Vzorek 6B LČG: 85% III 4 + 15% VI 7 - Fe 80, P 20; SC 1,029; FeSi 1%; FeSiMg6 1,2%; R _m = 391 MPa; A = 5,1%.....	41
Obr. 47 Křivka chladnutí: Vzorek 4B LČG; SC 1,027; FeSi 0,6%; FeSiMg6 0,8%; R _m = 358 MPa; A = 5,4%; HBW 30 = 166 HB	44
Obr. 48 Křivka chladnutí: Vzorek 5B LČG; SC 1,018; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1%; HBW 30 = 178 HB	44
Obr. 49 Křivka chladnutí: Vzorek 6B LČG; SC 1,029; FeSi 1%; FeSiMg6 1,2%; R _m = 391 MPa; A = 5,1% HBW 30 = 190 HB.....	45
Obr. 50 Zákalka vzorku 1C a 2C	46
Obr. 51 Vzorek 1C LLG: 60% I D 6 + 40% I C 4 - P 96, Fe 4; SC 0,854; FeSi 0,4%; R _m = 163 MPa; zvětšeno 500x	47
Obr. 52 Vzorek 5C LKG: 40% V 5 + 40% VI 5 + 20% III 5 - Fe 94, P 6; FeSi 1%; FeSiMg6 1,6%; R _m = 548 MPa; A = 10,2%; zvětšeno 500x	47
Obr. 53 Vzorek 1C LLG: 60% I D 6 + 40% I C 4 - P 96, Fe 4; SC 0,854; FeSi 0,4%; R _m = 163 MPa	48
Obr. 54 Vzorek 2C LLG: 80% I A 6 + 20% I C 6; - P 96, Fe 4; SC 0,96; FeSi 0,8%; R _m = 142 MPa	48
Obr. 55 Vzorek 3C LČG: 70% III 4 + 20% V 6 - Fe 80, P 20; SC 0,997; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1,2%; R _m = 415 MPa; A = 6,2%.....	48
Obr. 56 Vzorek 4C LČG: 75% III 4 + 25% V 5 - Fe 94, P 6; SC 1,004; FeSi 1%; FeSiMg6 1,4%; R _m = 489 MPa; A = 8,8%.....	49
Obr. 57 Vzorek 5C LKG: 40% V 5 + 40% VI 5 + 20% III 5 - Fe 94, P 6; FeSi 1%; FeSiMg6 1,6%; R _m = 548 MPa; A = 10,2%.....	49

Obr. 58 Vzorek 6C LKG: 80% VI 5 + 20% V 5- Fe 94, P 6; SC 0,978; FeSi 1%; FeSiMg6 1,8%	49
Obr. 59 Křivka chladnutí: Vzorek 3C LČG; SC 0,997; FeSi 0,8%; FeSiMg6 1,2%; $R_m = 415$ MPa; A = 6,2%; HBW 30 = 177 HB	52
Obr. 60 Křivka chladnutí: Vzorek 4C LČG; SC 1,004; FeSi 1%; FeSiMg6 1,4%; $R_m = 489$ MPa; A = 8,8%; HBW 30 = 183 HB	52
Obr. 61 Křivka chladnutí: Vzorek 6C LKG; SC 0,978; FeSi 1%; FeSiMg6 1,8%; HBW 30 = 233 HB	53

POUŽITÉ TABULKY

Tab. 1 Obsah prvků očkovaadel [3]	6
Tab. 2 Složení karbidu křemíku pro metalurgii [3]	11
Tab. 3 Legenda k vyhodnocení mikrostruktur [13]	17
Tab. 4 Chemické složení vsázkového materiálu	20
Tab. 5 Chemické složení karbidu křemíku SiC 90 [15]	25
Tab. 6 Chemické složení nauhlčovadla [15]	26
Tab. 7 Množství vloženého nauhlčovadla.....	27
Tab. 8 Chemické složení vzorků 1A-6A	33
Tab. 9 Mechanické vlastnosti odlitků 1A-6A	33
Tab.10 Množství očkovaadla a modifikátoru	37
Tab. 11 Chemické složení vzorků 1B-6B.....	42
Tab. 12 Mechanické vlastnosti odlitků 1B-6B	42
Tab. 13 Množství použitého očkovaadla a modifikátoru.....	46
Tab. 14 Chemické složení vzorků z třetí tavby 1C-6C	50
Tab. 15 Mechanické vlastnosti odlitků 1C-6C	50

POUŽITÉ GRAFY

Graf 1 Zkouška tlak: vzorky 1A – 4A.....	34
Graf 2 Zkouška tah: vzorky 5A – 6A.....	34
Graf 3 Zkouška tah: vzorky 1B – 6B.....	43
Graf 5 Zkouška tah: vzorky 1C – 6C.....	51
Graf 6 Výsledné hodnoty pevnosti v tahu a tvrdosti, vzorky 1C – 6C	51